



Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose

Management of upland rice varietal diversity to control blast

H. RAVELOSON¹
A. RAFENOMANJATO¹
A. RAMANANTSOANIRINA¹
M. SESTER²
L. M. RABOIN³

(1) Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA)
Centre Régional de Recherche Antsirabe - Tsivatrinikamo - BP 230 - Antsirabe 110 Madagascar
(2) Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Systèmes de Production
d'Altitude et Durabilité (SPAD), BP 230 - Antsirabe 110 - Madagascar
(3) Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier - Languedoc - Roussillon France

Résumé

Le riz constitue l'aliment de base de la population à Madagascar. La culture du riz pluvial s'est développée sur les versants des collines des Hautes Terres malgaches, pour répondre à une forte demande et faire face à la saturation des terres inondées permettant la riziculture irriguée. Actuellement, le riz pluvial fait partie intégrante du paysage et devient même par endroit dominant dans les systèmes de culture pluviaux. Cette rapide extension de la riziculture pluviale est le résultat de la diffusion de variétés adaptées à l'altitude, développées dans le cadre du programme d'amélioration génétique mené en partenariat par le Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (FOFIFA) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) depuis le milieu des années 1980. Malheureusement, la plupart de ces premières variétés se sont révélées sensibles à la pyriculariose entraînant des épidémies importantes dès le début des années 2000. La pyriculariose, causée par *Magnaporthe oryzae* est la maladie fongique la plus dévastatrice du riz, en particulier pour la riziculture pluviale. Cette maladie représente une menace et un frein à la diffusion des systèmes de culture à base de riziculture pluviale à Madagascar. La principale méthode de lutte contre la pyriculariose est la sélection et l'utilisation de variétés résistantes. Cependant les échecs des variétés résistantes, du fait du contournement des résistances par les populations de l'agent pathogène, sont très nombreux. Dans le contexte d'une agriculture de subsistance et de petit paysannat sur les Hautes Terres centrales, il est crucial de développer des méthodes de lutte pouvant réduire la pression de la maladie sans recourir aux pesticides et améliorer la durée de l'efficacité des résistances variétales. Les associations ou mélanges de variétés de riz pourraient permettre de réduire les épidémies de pyriculariose.



Le projet GIPYRI (Gestion Intégrée de la Pyriculariose du Riz pluvial) mis en œuvre dans le cadre de PArtenariat et Recherche dans le secteur RURal (PARRUR), financé par le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) du Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France, a pour objectif d'optimiser l'utilisation de la diversité génétique des résistances du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose sur les Hautes Terres de Madagascar. Ce projet comporte trois volets :

- L'étude des populations de l'agent pathogène et la caractérisation des résistances du riz vis-à-vis de ces différentes populations nécessitant la mise au point d'une technique d'inoculation artificielle au sein de laboratoire de phytopathologie de la station régionale de recherche du FOFIFA Antsirabe. Des analyses des réactions de variétés différentielles et de variétés du riz pluvial par inoculation avec des souches collectées dans la région du Vakinankaratra, ont été menées. Les résultats ont permis d'identifier les gènes de résistance qui pourraient être contournés et de voir les réponses de variétés du riz pluvial vis-à-vis des souches testées. Les informations obtenues aideront beaucoup à l'amélioration des stratégies de lutte contre la pyriculariose.
- La construction de stratégies de déploiement des résistances à la pyriculariose à l'échelle de la parcelle cultivée : étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux sur le contrôle des épidémies de pyriculariose. Plusieurs tests de mélanges variétaux ont été conduits durant les trois campagnes de 2011-2014 en associant des variétés sensibles avec des variétés tolérantes ou des variétés résistantes à la maladie. Les résultats de tous les essais montrent l'atténuation de l'attaque de pyriculariose dans les parcelles cultivées en mélange par rapport aux parcelles cultivées en pure.
- La validation de l'efficacité des mélanges de variétés en conditions paysannes avec l'aide de partenaires intervenant dans le développement agricole. Durant les campagnes 2011-2013, l'efficacité de mélange variétal comparé à la culture pure, a été confirmée dans les dispositifs mis en place en milieu paysan.

Les mélanges variétaux pourraient permettre de continuer à cultiver des variétés devenues sensibles par leur utilisation en mélange avec des variétés résistantes ou dans des mélanges constitués de variétés possédant des gènes de résistance différents. Ils constituent un des moyens pour réduire le risque d'une épidémie forte engendrée par le déploiement massif d'une variété tolérante par les agriculteurs en cas de contournement de sa résistance par des souches plus virulentes

Mots clés : riz pluvial, pyriculariose

Abstract

Rice is the staple food of the population in Madagascar. In the central highland of Madagascar, upland rice culture has developed on the hillsides to meet a strong demand of rice and to cope with the saturation of flooded land prone to irrigated rice. Nowadays, upland rice is a part of the landscape and becomes even dominant in rainfed cropping systems in some areas. This rapid expansion of upland rainfed rice is the result of the diffusion of adapted varieties, developed by the breeding program conducted in partnership by the National Applied Research in Madagascar Rural Development Centre (FOFIFA) and Centre for International Cooperation in Agronomic Research for Development (CIRAD) since mid 1980. Unfortunately, most of these early varieties were sensitive to blast causing large outbreaks in the early 2000s.

The GIPYRI project (Integrated Management of the blast in Upland Rice) implemented within the framework of a partnership and research in rural sector (PARRUR) and funded by the Priority Solidarity Fund (FSP) of the Cooperation and Cultural Action of the France Embassy, was intended to optimize the use of resistant upland rice genetic diversity to control blast in the highlands of Madagascar. The project had three components:

- The study of populations of the pathogen and characterization of upland rice resistance face to these populations that requires the development of an artificial inoculation technique in plant pathology laboratory of the regional research station of FOFIFA in Antsirabe. Analysis of the reactions of the differential varieties and upland rice varieties by inoculation with strains collected in the Vakinankaratra region were conducted. The results have identified resistance genes that could be bypassed and the upland rice varieties' responses to the strains. These informations will help a lot in the improvement of strategies against blast.
- Construction of deployment strategies of resistance to blast on the farm level: to study and optimize the effect of varietal mixtures to control rice blast epidemics. Several varietal mixtures tests were conducted during three seasons of 2011-2014 involving susceptible varieties with resistant varieties resistant to the disease. The results of all tests show the attenuation of the blast attack in the plots cultivated with mixture compared to pure cultivated plots.
- The validation of the effectiveness of mixtures of varieties in farmers' conditions with the help of partners involved in agricultural development. During the 2011-2013 campaign, the varietal mixtures efficiency compared to pure culture was confirmed in the systems implemented at farm level.

The varietal mixtures allow continuing to grow susceptible varieties when used in a mixture with resistant varieties or mixtures of varieties with different resistance genes. They are means to reduce the risk of a major epidemic caused by the massive deployment of a tolerant variety by farmers in cases when the resistance is bypassed by more virulent strains.

Keywords: upland rice, blast disease

Introduction

A Madagascar, le riz occupe une place importante au point de vue alimentaire et économique. Il constitue l'aliment de base de la population malgache avec une consommation annuelle moyenne par habitant de 138 kg en milieu rural et 118 kg en milieu urbain, ce qui classe le pays parmi les plus gros consommateurs de riz au monde (UPDR/FAO, 2001). Pourtant, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins, ce qui amène le pays à importer régulièrement du riz. Sur les Hautes Terres de Madagascar, très peuplées, les paysans cultivent le riz irrigué partout où l'eau est disponible et où il a été possible d'aménager des rizières (plaines irriguées, bas-fonds ou terrasses à flanc de colline). Désormais, les possibilités de développement de nouvelles surfaces en riz irrigué y sont très limitées. Pour répondre à l'augmentation de la demande en riz, il est donc nécessaire d'intensifier la culture du riz irrigué et de développer de nouveaux systèmes de production de riz, tels que la riziculture pluviale.



La riziculture pluviale d'altitude a connu un essor important au-dessus de 1300 m d'altitude avec la création et la diffusion de variétés résistantes au froid. Toutefois, le riz pluvial fait face à des nombreuses contraintes biotiques et abiotiques dont en particulier la pyriculariose, maladie fongique causée par *Magnaporthe oryzae*. C'est la maladie fongique la plus importante du riz à travers le monde (Ou, 1985). Elle sévit dans tous les types de riziculture, mais s'avère plus préjudiciable en riziculture pluviale (Lai *et al.*, 1999). En l'absence de stratégies de protection, les pertes annuelles causées par cette maladie varient entre 10 % et 30 % de la production (Skamnioti et Gurr, 2009) et dans certains cas, les pertes de récolte peuvent atteindre 100 % pour des variétés très sensibles. Au champ, les méthodes de lutte contre la maladie sont généralement centrées sur la lutte chimique et l'amélioration variétale (Pennisi, 2010). L'utilisation de variétés résistantes constitue un moyen de lutte efficace et économique contre la pyriculariose. Toutefois, les phénomènes de contournement des résistances du riz par les souches de *M. oryzae* sont fréquents. Ce problème a déjà été rencontré dans le cas de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres de Madagascar où les premières variétés diffusées adaptées à la haute altitude ont dû être abandonnées et remplacées par des variétés tolérantes parce qu'elles étaient devenues trop sensibles à la pyriculariose.

A l'heure actuelle, une variété de riz pluvial tolérante à la pyriculariose domine très largement le paysage agricole dans les zones d'altitude. Une telle situation présente beaucoup de risque en cas d'adaptation de l'agent pathogène responsable de la pyriculariose. Il est donc indispensable, pour assurer la durabilité de la riziculture pluviale, d'intégrer différentes stratégies de lutte contre la pyriculariose impliquant l'amélioration génétique, la mise au point de stratégies de déploiement des résistances disponibles au niveau des parcelles ou des terroirs ou encore la gestion agronomique des systèmes de culture (Sester *et al.*, 2008 ; Sester *et al.*, 2014).

L'utilisation extensive de variétés uniformes possédant des gènes de résistances très spécifiques vis-à-vis des agents pathogènes expose inévitablement, à terme, à de fortes épidémies dès lors que les résistances déployées sont contournées. A l'inverse, la diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés.

La diversification génétique qui peut être mise en œuvre au niveau des espèces cultivées, des variétés d'une espèce cultivée ou des gènes de résistance de cette espèce, peut être un outil pour contrôler les maladies (Wolfe, 1985). Les associations de variétés ont déjà montré leur potentiel pour ralentir les épidémies dans le cas de maladies fongiques à dispersion éolienne telles que les rouilles ou l'oïdium des céréales (Finckh *et al.*, 2000).

Des résultats spectaculaires ont aussi été obtenus récemment à grande échelle dans le Yunnan (Chine) pour le contrôle de la pyriculariose du riz par l'utilisation de mélanges de différentes variétés de riz en culture irriguée (Zhu *et al.*, 2000). En revanche cette stratégie est peu documentée pour le riz pluvial.

Dans notre équipe, nous avons obtenu un certain nombre de résultats prometteurs en utilisant des mélanges variétaux binaires (une variété sensible diluée dans une variété résistante ; Raboin *et al.*, 2012). Néanmoins, cette stratégie doit encore faire l'objet de recherches pour être optimisée.

Le projet GIPyri (« Gestion Intégrée de la Pyriculariose », financé sur Fonds FSP PARRUR) se propose donc d'évaluer en conditions expérimentales contrôlées ainsi qu'en milieu paysan les potentialités des mélanges variétaux pour limiter les épidémies de pyriculariose.

Contexte de l'étude

LE RIZ PLUVIAL D'ALTITUDE DANS LA RÉGION DU Vakinankaratra

Selon le mode d'alimentation hydrique, la riziculture malgache peut être subdivisée en trois types : 1) la riziculture irriguée englobant toute culture de riz dans les bas-fonds et les plaines, faite sous lame d'eau durant le cycle cultural ; 2) la riziculture pluviale englobant toute culture pratiquée sur sol exondé des versants ou des parties sommitales des collines et dont l'alimentation hydrique est totalement assurée par la pluie ; et 3) la riziculture de *tavy* qui est une riziculture pluviale itinérante sur l'abattis-brûlis de la végétation préexistante. La pratique de la riziculture pluviale dans les zones d'altitude supérieure à 1300 m ne date que du milieu des années 1990.

Un programme de création variétale spécifique a été initié au milieu des années 1980 dans le cadre d'un partenariat entre le Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (FOFIFA) et le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Depuis, une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont été sélectionnées et proposées à la diffusion. Elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1800 m d'altitude.

Grâce à ces variétés, la riziculture pluviale a connu un développement extrêmement rapide, en particulier dans la région du Vakinankaratra, entre les villes d'Antsirabe et d'Ambatolampy (70 km au nord), où les efforts de recherche et de diffusion se sont concentrés. Désormais, le riz pluvial fait partie intégrante du paysage et devient même par endroit dominant dans les systèmes de culture pluviaux (Raboin *et al.*, 2013).

Le riz pluvial fait cependant face à de nombreuses contraintes : i) climatiques incluant le froid et la grêle qui peuvent entraîner des pertes de rendement importantes, et ii) biotiques incluant les formes larvaires de Coléoptères *Scarabeoidea* appelées communément « vers blancs » ou leurs formes adultes comme dans le cas de *Heteronychus sp.* (Randriamanantsoa *et al.*, 2010) et la pyriculariose qui peuvent détruire la culture si les infestations sont sévères. Cette dernière est une maladie fongique qui représente une menace permanente pour le développement de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres.

LA PYRICULARIOSE DU RIZ

La pyriculariose, causée par *Magnaporthe oryzae*, est une contrainte majeure pour la production du riz. Elle est décrite dans tous les pays rizicoles (Ou, 1985). Cette maladie est présente à tous les stades de développement de la culture et peut attaquer aussi bien les feuilles que les tiges paniculaires (Figures 3A et 3B). La pyriculariose foliaire se caractérise par des lésions fusiformes ou ovales typiques sur les feuilles. En cas d'attaque sévère sur des individus sensibles, ces lésions peuvent fusionner et aboutir au dessèchement complet des feuilles. Les lésions sont constituées de taches à centre gris blanchâtre, à bord brun noir avec une zone extérieure jaune. La pyriculariose paniculaire se présente sous forme de nécroses de la tige paniculaire à la base de la panicule (pyriculariose du cou) ou sur les rachis de l'inflorescence, entraînant le dessèchement complet ou partiel de la panicule. L'agent pathogène est également capable d'infecter les racines (Sesma et Osbourne, 2004).



Cette maladie peut avoir des conséquences graves sur le rendement. Selon Skamnioti et Gurr (2009), en l'absence de stratégies de protection, les pertes annuelles causées par cette maladie varient entre 10 % et 30 % de la production et dans certains cas, les pertes de récolte peuvent atteindre 100 % pour des variétés très sensibles. Le développement des épidémies de pyriculariose résulte d'interactions complexes entre l'agent pathogène, la plante, et les facteurs environnementaux favorables à la maladie. L'impact de cette maladie sur la production en a fait un modèle pour les recherches sur les relations entre une plante et un champignon phytopathogène (Valent, 1990). Il a été étudié à la fois sous l'angle de la plante avec la caractérisation de nombreux gènes de résistance (Ballini *et al.*, 2008 ; Roy Chowdhury *et al.*, 2012) et sous l'angle de l'agent pathogène avec l'étude de ses gènes d'avirulence, de la diversité des populations et de la compréhension de son cycle de vie (Saleh *et al.*, 2013 ; Ebbolé, 2007).

La pyriculariose est une maladie polycyclique c'est-à-dire que l'agent pathogène peut réaliser plusieurs cycles d'infection pendant une période de croissance de la plante infectée. Le cycle de la maladie commence par l'arrivée des spores sur les plants de riz assurant l'infection primaire. L'inoculum primaire peut provenir des semences ou des résidus infectés présents à proximité des parcelles ou de conidies venant d'autres parcelles infectées. Les conidies se fixent et adhèrent sur la surface de l'organe cible de la plante hôte à l'aide d'un mucilage. Elles germent ensuite en produisant un tube germinatif qui s'allonge jusqu'à former une nouvelle cellule, l'appressorium, qui forme à son tour un tube capable de percer la cuticule et la paroi de la cellule hôte épidermique.

Après la pénétration dans la cellule hôte, un réseau d'hyphes va se développer qui envahit et colonise les tissus attaqués produisant les symptômes après 4 ou 5 jours. Les lésions sporulent et donnent naissance à de nouvelles conidies qui constituent l'inoculum secondaire et le cycle recommence (Figure1).

En général, le temps entre le début de l'infection et la sporulation est d'environ 7 à 10 jours (Ebbolé, 2007 ; Ribot *et al.*, 2008). Cette rapide production de nouvelles conidies assure la propagation de la maladie sur la plante attaquée elle-même, sur des plantes situées aux alentours dans la même parcelle ou même à plus grande distance vers des parcelles voisines. Dans les régions où les épidémies de pyriculariose sont régulières, la rapidité de leur développement et l'importance des pertes que provoque une attaque sur le cou des panicules, en font la maladie qui fait courir les plus grands risques à la riziculture.

Les méthodes de lutte contre cette maladie sont essentiellement prophylactiques, chimiques et génétiques avec l'utilisation de variété résistante. Les méthodes prophylactiques correspondent à l'utilisation de semences saines, l'enlèvement des résidus infectés et la bonne gestion des systèmes de culture (rotation culturale, apport raisonné des engrais azotés) afin de réduire l'initiation et la propagation de la maladie (Pennisi, 2010 ; Raveloson *et al.*, 2013). La lutte chimique constitue un des moyens pour contrôler cette maladie et les fongicides développés contre la pyriculariose représentent un des plus gros marchés mondiaux car cette maladie fait partie des cibles des grandes sociétés phytosanitaires. Ces fongicides ont été utilisés de plus en plus fréquemment dans de nombreux pays développés mais la lutte chimique n'est réalisable à Madagascar que dans des situations exceptionnelles, étant donné que la majorité des producteurs malgaches n'ont pas les moyens économiques nécessaires pour pouvoir recourir à des traitements fongicides. L'utilisation de variétés résistantes est sans doute la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour lutter contre la pyriculariose, mais les risques de contournement des résistances par adaptation de l'agent pathogène sont importants (Ballini *et al.*, 2008).

La pyriculariose sévit dans tous les types de riziculture, mais s'avère plus préjudiciable en riziculture pluviale (Lai *et al.*, 1999). Cette maladie représente donc une menace pour le développement de la riziculture pluviale sur les Hautes Terres centrales malgaches. Ainsi, les premières variétés créées (qui

ont été diffusées dès le milieu des années 1990 et ont permis le démarrage de la culture du riz pluvial dans les zones d'altitude du Vakinankaratra) ont subi des épidémies importantes dès le début des années 2000. La résistance à la pyriculariose a été rapidement surmontée chez la plupart de ces premières variétés, à base génétique étroite (Raboin *et al.*, 2013).

Des propositions de stratégies de lutte pour minimiser l'impact de la pyriculariose, abordables dans le contexte d'agriculture de subsistance de Madagascar, sont indispensables.

LES MÉLANGES VARIÉTAUX COMME MOYEN DE LUTTE CONTRE LA PYRICULARIOSE

La diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés (Mundt, 2002). Les plantes ont plusieurs formes de résistance pour bloquer ou réduire les attaques des agents pathogènes. La plupart des agents pathogènes présentent plutôt un haut degré de spécificité de l'hôte. D'après Agrios (2005), des espèces de plantes sont résistantes à certains pathogènes parce qu'elles appartiennent à des groupes taxonomiques qui sont en dehors de la gamme d'hôtes de ces agents pathogènes. Cette forme de résistance est appelée non hôte. Les plantes dites non hôtes sont totalement résistantes aux pathogènes d'autres plantes, même dans les conditions les plus favorables pour le développement de la maladie. Mais dans le cas où une espèce de plante est hôte d'un pathogène particulier, la sensibilité envers différentes races de l'agent pathogène est très variable au sein de cette espèce. On parle de « résistance hôte », lorsqu'une espèce de plante est sensible à un pathogène mais que certaines plantes (variétés) de cette espèce végétale résistent à certaines souches du pathogène. Il existe alors deux types de résistance: la résistance partielle, quantitative, polygénique ou horizontale et la résistance complète, qualitative, monogénique, race spécifique, ou verticale. La résistance complète à un agent pathogène donné repose sur un déterminisme monogénique, qui conditionne la compatibilité de l'interaction entre l'hôte et l'agent pathogène selon une relation gène pour gène (Flor, 1971). Lorsqu'un gène de résistance permet à la plante de détecter les souches de l'agent pathogène portant le gène d'avirulence correspondant, cela amène la plante à réagir pour bloquer l'attaque de l'agent pathogène. En l'absence du gène de résistance ou du gène d'avirulence, la maladie se développe. Au contraire, la résistance partielle présente un déterminisme polygénique. Ce type de résistance variétale limite l'impact des agents pathogènes sur les cultures, en diminuant la sévérité des symptômes et en ralentissant la progression des épidémies.

L'utilisation extensive de variétés uniformes possédant des gènes de résistances très spécifiques vis-à-vis des agents pathogènes expose inévitablement, à terme, à de fortes épidémies dès lors que les résistances déployées sont contournées par adaptation de l'agent pathogène. A l'inverse, la diversité génétique de la plante hôte semble être un mécanisme efficace pour réduire l'impact des maladies dans les écosystèmes naturels ou dans les systèmes paysans traditionnels où des écotypes très diversifiés sont utilisés.

La diversification génétique qui peut être mise en œuvre au niveau des espèces cultivées, des variétés d'une espèce cultivée ou des gènes de résistance de cette espèce peut être un outil pour contrôler les maladies. L'utilisation de mélanges variétaux pour limiter l'impact de maladies a déjà fait la preuve de son efficacité dans de nombreux cas, en particulier pour certaines maladies des céréales (Finckh *et al.*, 2000). Les principaux mécanismes de réduction de la sévérité des épidémies dans les mélanges sont l'effet de dilution, les effets de barrière, et la résistance induite (Wolfe, 1985 ; Mundt, 2002).



L'effet de dilution repose sur la diminution de la probabilité pour une spore de produire une nouvelle infection du fait de la diminution de la densité de plantes sensibles dans les mélanges. Plus la densité de plantes sensibles est faible, plus la propagation de l'épidémie est réduite.

Les effets de barrière sont expliqués par la présence de plantes résistantes entre les plantes sensibles. Les plantes résistantes agissent comme une barrière physique en bloquant le passage des spores d'une plante sensible à une autre.

La résistance induite par prémunition est l'effet de résistance attribuable à des mécanismes de défense déclenchés par un stimulus avant l'infection par une souche et s'exprimant contre cette dernière. Ce stimulus est provoqué par une autre souche incompatible. En d'autres termes, lorsqu'une spore avirulente se dépose sur une plante résistante, elle active les mécanismes de défense de la plante qui la protègent contre une infection ultérieure par une spore virulente.

Les mélanges de variétés de riz ont déjà été utilisés avec succès pour limiter les épidémies de pyriculariose.

Des mélanges de riz sont cultivés en Chine dans la province de Yunnan, où le climat est favorable au développement de la maladie. Ces mélanges variétaux sont constitués entre une variété de riz gluant, de haute valeur gustative mais très sensible à la maladie, et des variétés hybrides plus résistantes. La sévérité de maladie, qui était de 20 % en culture monovariétale de riz gluant, n'est que de 1 % dans les mélanges. Le rendement des mélanges a augmenté de 10 % par rapport aux cultures monovariétales. Les mélanges ont été rapidement adoptés et leur superficie est passée de 800 ha en 1998 à 40 000 ha en 2000. La récolte manuelle des cultures en ligne a permis de séparer les variétés de différentes qualités (Zhu *et al.*, 2000). L'efficacité du mélange à réduire l'impact de pyriculariose a été spectaculaire et a en partie été expliquée par le fait que la variété sensible était plus haute que la variété résistante ce qui aurait eu pour effet de limiter l'humidité et donc la sévérité de l'attaque (Zhu *et al.*, 2005).

Les mélanges variétaux ont également été récemment étudiés pour la lutte contre la pyriculariose sur le riz pluvial (Castilla *et al.*, 2010) et ont été évalués dans le cadre de la riziculture pluviale d'altitude sur les Hautes-Terres de Madagascar (Raboin *et al.*, 2012).

OBJECTIFS DU PROJET GIPYRI/PARRUR

L'objectif général du projet est d'optimiser l'utilisation de la diversité génétique des résistances du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose sur les Hautes Terres de Madagascar. Il se décline en trois volets :

- L'étude des populations de l'agent pathogène *M. Oryzae* et la caractérisation des résistances du riz vis-à-vis de ces différentes populations;
- La construction de stratégies de déploiement des résistances à la pyriculariose à l'échelle de la parcelle cultivée : étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux sur le contrôle des épidémies de pyriculariose;
- La validation de l'efficacité des mélanges de variétés en conditions paysannes avec l'aide de partenaires intervenant dans le développement agricole.

Le projet est construit pour répondre à la fois à la demande des paysans malgaches en matière de lutte contre la pyriculariose mais aussi pour mieux comprendre comment gérer la diversité pour lutter durablement contre cette maladie.

La pyriculariose étant la maladie fongique du riz la plus répandue dans le monde, les connaissances acquises sur les Hautes Terres malgaches intéresseront aussi les autres régions rizicoles du Monde.

Caractérisation des populations de la pyriculariose et des résistances du riz à la pyriculariose

OBJECTIFS

Le programme de sélection du CIRAD-FOFIFA dispose de ressources génétiques importantes régulièrement enrichies par de nouvelles introductions qu'il est nécessaire de caractériser pour leur résistance à la pyriculariose.

Cette caractérisation repose sur une analyse fine des réactions des variétés de riz lorsqu'elles sont confrontées à un panel de souches du champignon au cours d'inoculations contrôlées. Le panel de souches utilisé et son spectre de virulence doivent être représentatifs des différentes populations de l'agent pathogène dans les zones ciblées par le programme de sélection ce qui implique un travail permanent de caractérisation des populations : diversité et structure génétique des populations et caractérisation du pouvoir pathogène (agressivité et virulence) des souches collectées.

Ce travail est indispensable à une gestion optimale de la diversité des résistances disponibles pour la recombinaison grâce au travail de sélection ou pour la déployer efficacement et durablement sur le terrain par exemple sous forme de mélanges de variétés (McDonald and Linde, 2002).

RENFORCEMENT DES CAPACITÉS DU LABORATOIRE DE PHYTOPATHOLOGIE DU FOFIFA À Antsirabe

Une nouvelle infrastructure destinée aux travaux de phytopathologie a été construite dans le cadre de GIPYri à la Station Régionale de Recherche du FOFIFA Antsirabe qui comprend :

- Une salle de laboratoire, destinée à l'isolement, à la conservation des souches de pyriculariose, à la préparation d'inoculum pour les tests de compatibilité agent pathogène/variété.
- Une chambre d'inoculation et une chambre d'incubation (obscurité, hygrométrie élevée) où les plants sont placés 24 heures après inoculation.
- Une serre à deux compartiments : un compartiment pour les plantes avant inoculation, un autre pour les plantes après inoculation et incubation.

Cette structure est opérationnelle depuis septembre 2013 et permet de conduire les tests de pathogénie par inoculation artificielle qui permettent de caractériser les réponses des variétés de riz vis-à-vis des souches de *M. oryzae* collectées dans la région du Vakinankaratra.



MÉTHODE D'INOCULATION ARTIFICIELLE DU RIZ AVEC LES SOUCHES DE *M. ORYZAE*

Le test de pathogénie par l'inoculation artificielle est un moyen pour caractériser la variabilité du pouvoir pathogène des souches de *M. oryzae* et les réactions des variétés testées. La conduite de ce test comporte plusieurs étapes (Figure 4). Des suivis d'attaques de pyriculariose sur le terrain ont été réalisés et des échantillons de feuilles et de panicules ont été collectés sur des dispositifs expérimentaux et des parcelles paysannes infectés par la maladie. Chaque échantillon est identifié par la date de collecte, le lieu (nom de l'endroit, longitude, latitude et altitude), la plante (riz ou autres plantes hôtes), le nom de la variété et le type de culture (riziculture irriguée ou pluviale). L'isolement monospore commence par la mise en sporulation de ces échantillons. Une des spores produites est transférée sur un milieu farine de riz pour avoir une souche pure. La bonne sporulation de cette souche est un élément requis pour sa conservation. La souche nouvellement conservée sera nommée et numérotée selon son entrée dans la liste de collection des souches. Les plants de riz sont cultivés pour être prêts à l'inoculation après 21 jours. Les souches conservées sont remises en culture sur un milieu de farine du riz pendant 8 à 12 jours. Durant les 4 derniers jours, la culture de champignon est exposée en permanence sous une lumière fluorescente afin d'obtenir beaucoup de conidies pour la préparation de l'inoculum. Le milieu de culture avec le champignon est mis en suspension avec ajout d'eau distillée puis la solution est filtrée pour séparer les mycéliums et les conidies. Le comptage de concentration de conidies se fait à l'aide de cellule de Malassez pour avoir la concentration d'inoculum requise pour l'inoculation (100 000 spores/ml). La pulvérisation des souches préparées sur les plants de riz constitue l'étape d'inoculation artificielle, ensuite ces plants de riz sont mis dans une salle d'incubation à 100 % d'humidité relative et à l'obscurité pendant 24 heures. Après ils sont transférés dans le compartiment de serre post inoculation. Enfin la notation de symptômes sur les plants de riz est réalisée entre 7 à 10 jours après l'inoculation, suivant une échelle permettant d'évaluer la sensibilité de la variété à la souche de pyriculariose testée (Figure 2).

PREMIERS RÉSULTATS

Spectre de virulence de 8 souches

Cent cinquante échantillons de feuilles ou de panicules infectés par la pyriculariose ont été collectés dans différentes zones de la région du Vakinankaratra à la fois sur le riz pluvial et sur le riz irrigué pour constituer une collection de souches représentative de la région. A partir de ces échantillons, une trentaine de souches de *M. oryzae* ont pu être isolées et conservées durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014.

Pour conduire les tests d'inoculation, 30 variétés ont été utilisées : 18 variétés différentielles (leurs gènes de résistance sont connus), 8 variétés de riz pluvial (6 variétés d'altitude et 2 variétés de moyenne altitude) et 4 autres variétés irriguées. Huit souches collectées dans différentes zones de la région du Vakinankaratra ont été utilisées pour réaliser les inoculations artificielles. La réaction des variétés après les inoculations est présentée dans le tableau 1.

Les réactions des variétés différentielles vis-à-vis de ces souches montrent que 11 d'entre elles présentent des réponses sensibles en combinant la capacité de ces souches à attaquer les variétés. Les gènes de résistances suivants sont contournés par au moins une des souches testées : CO 39 (témoin sensible), ZenithAcc 32558 (Pia+z), K60 (Pikp), K59 (Pit), C 104 Lac (Pi1), K3 (Pikh), Kanto 51 (Pik), Fujisaka n°5 (Pi1+ks), K2 (Pikp+a), Fukunishiki (Pish+z), K1 (Pita). En revanche, les gènes de résistance ou les combinaisons de gènes de résistance contenus dans les variétés C101 A 51 (Pi2=Pi25), IR 1529 (Pi33), C101 Lac (Pi1+1b+33), CT 13432-3R (Pi1+2+33), Pi n°4 (Pita2), Toride 1 (Pizt) et 75-1-127 (Pi9) restent

efficaces face aux 8 souches testées. Selon les suivis de ces variétés durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014 sur les dispositifs de sélection à Andranomanelatra, les réponses au champ de ces variétés différentielles sont cohérentes avec celles observées lors des inoculations artificielles.

La réponse aux inoculations des variétés de riz pluvial et des 4 autres variétés irriguées confirme en général les observations sur le terrain, sauf pour la variété B 22 qui est sensible sur le terrain alors qu'elle n'est sensible qu'avec la souche collectée sur elle-même et de réponse intermédiaire ou résistante vis-à-vis des autres souches.

L'objectif de ce travail est de constituer un panel de souches représentatif de la région du Vakinankaratra. La connaissance de la capacité de chaque souche à attaquer les variétés testées permet de constituer une collection de souches qui ont des spectres de virulence différents et d'identifier des souches qui ont des spectres de virulence très larges. Ces souches seront utilisées pour tester la résistance des variétés utilisées dans le programme de sélection et des nouvelles variétés à diffuser.

Résultats obtenus sur la variété Chhomrong Dhan

Chhomrong Dhan est utilisée dans plus de 89 % des exploitations qui pratiquent la riziculture pluviale sur les Hautes Terres, loin devant toutes les autres variétés pluviales d'altitude qui ont été diffusées (Raboin *et al.*, 2014).

Les résultats des inoculations artificielles indiquent que cette variété est sensible vis-à-vis des souches MAD 19, 22 et 32. Ce résultat incite à renforcer la surveillance au champ de l'évolution de la pyriculariose sur cette variété.

Étude et optimisation de l'effet des mélanges variétaux pour le contrôle des épidémies de pyriculariose

MESURES DE LA SÉVÉRITÉ DE LA PYRICULARIOSE

L'évaluation de l'efficacité du mélange consiste à comparer la sévérité de la maladie sur une même variété cultivée en mélange et en culture pure. Le principe de suivi de la pyriculariose est basé sur l'observation des symptômes et l'évaluation de l'intensité de la maladie présente sur les terrains. La notation des symptômes foliaires a été effectuée sur 10 poquets de chaque parcelle. Pour chaque poquet, le nombre total de talles et le nombre de talles infectées ont été comptés. Pour trois talles malades, le pourcentage de surface foliaire attaquée a été estimé sur les 4 feuilles les plus hautes. La sévérité foliaire est alors calculée :

Sévérité foliaire = Moyenne parcellaire [moyenne des % de surface attaquée sur les talles malades * nombre de talles malades / nombre total de talles].

Pour la pyriculariose paniculaire, sur chacun des 10 poquets, le nombre total de panicules et le nombre de panicules malades ont été également comptés. Pour 5 panicules malades, le pourcentage de grains atteints a été évalué. La sévérité paniculaire à l'échelle de la parcelle est alors estimée :

Sévérité paniculaire = Moyenne parcellaire [moyenne des % de grains attaqués sur les panicules malades * nombre de panicules malades / nombre total de panicules].

Tableau 1 : Réponses de variétés vis à vis des souches collectées dans le Vakinankaratra

Lieu de collecte		Hautes Terres RP						Moyen Ouest RP				Hautes Terres RI	
Année de collecte		2013	2013	2014	2014	2014	2014	2013	2013	2014	2014	2014	2014
Variétés	Gène de résistance	Site d'évaluation		MAD 19	MAD 20	MAD 32	MAD 23	MAD 16	MAD 12	MAD 22	MAD 29		
CO 39	Témoin					S	S	S	S	MS	S		S
Zenith Acc32558	Pi(a+z)					R	S	S	S	S	S		S
K60	Pikp			MS	S	MS	S	S	S	S	S	MR	
K59	Pit			S	S	S	S	S	MS	MS	S		S
C 104 Lac	Pi 1			S	S	S	S	S	S	R	R		R
K3	Pikh			S	MS	S	S	MR	S	S	S		R
Kanto 51	Pik			MS	MS	S	S	MR	MS	S	S	MR	
Fujisaka n° 5	pi1+ks			MR	R	MS	S	MR	MR	S	S	R	
K2	Pikp+a			MR	MS	MS	S	MS	MS	S	S	MR	
Fukunishiki	Pish+z			S	MS	MR	MS	MR	MS	S	S	MR	
K1	Pita			MR	R	S	MR	R	MS	MS	MS		MS
C 101 A 51	Pi2=Piz5			R	MS	R	R	R	R	R	R		R
IR 1529	Pi33			R	R	R	R	R	R	R	R		R
C 101 Lac	Pi(1+1b+33)			R	R	R	R	R	R	R	R		R
CT 13432-3R	Pi(1+2+33)			R	R	R	R	R	R	R	R		R
Pi n°4	Pita2			R	R	R	R	R	R	R	R		R
Toride 1	Pizt			R	R	R	R	R	R	R	R		R
75-1-127	Pi 9			R	R	R	R	R	R	R	R		R
FOFIFA 154	Très sensible	Andranomanelatra		S	S	S	S	S	S	S	S		R
FOFIFA 152	sensible	Andrano.		S	S	S	S	S	S	S	S		R
B22	sensible	Ivory		MR	MR	R	R	MS	S	MS	R		R
FOFIFA 161	tolérante	Andranomanelatra		MR	R	R	MR	MS	MS	MS	R		R
Chhomrong Dhan	tolérante	Andranomanelatra		S	MS	S	MS	MS	MS	S	S		R
FOFIFA 173	Tolérante	Andranomanelatra		MR	R	S	R	MR	MR	R	R		R
Nerica 4	Tolérante	Ivory		R	MR	R	R	R	R	R	R		R
FOFIFA 172	Résistante	Andranomanelatra		R	R	R	R	R	R	R	R		R
Kasalath	Sensible	Ivory		S	S	S	S	S	S	S	S		S
Nipponbarre	Résistante	Andranomanelatra		MS	MS	S	S	MS	MS	S	S	MR	
Moroberekan	Résistante	Andranomanelatra		R	R	R	R	R	R	R	R		R
IR 64	Résistante	Andranomanelatra		R	R	R	R	R	R	R	R		R

MAD 12 : souche collectée sur la variété B 22 à Ivory : dispositif expérimental
MAD 16 : souche collectée sur la variété Nerica 4 à Ivory : dispositif expérimental
MAD 19 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan à Andalamahitsy : parcelle paysanne
MAD 20 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan à Imerimandroso : parcelle paysanne
MAD 22 : souche collectée sur la variété Kasalath à Ivory : dispositif expérimental
MAD 23 : souche collectée sur FOFIFA 152 à Andranomanelatra : dispositif expérimental
MAD 29 : souche collectée sur la variété locale Vary botakely à Andranomanelatra : parcelle paysanne
MAD 32 : souche collectée sur la variété Chhomrong Dhan sur le dispositif matrice à Andranomanelatra

RP : riz pluvial
RI : riz irrigué

S : Sensible
MS : Moyennement sensible
MR : Moyennement résistante
R : résistante

ARRANGEMENT ET PROPORTION DES VARIÉTÉS À ASSOCIER

Le nombre de composantes (variétés), la proportion des différentes composantes et l'arrangement spatial des composantes d'un mélange variétal doivent être optimisés. Dans une expérience réalisée en 2007 et déjà publiée en 2012 (Raboin *et al.*, 2012), trois arrangements de mélanges à deux composantes (associant une variété très sensible et une variété résistante) ont été comparés à la culture pure de la variété très sensible. Il s'agissait d'un mélange en ligne alternant une ligne d'une variété résistante (F 172) et une ligne d'une variété très sensible (F 154), d'un mélange en ligne alternant un rang de la variété très sensible avec 5 rangs de la variété résistante et d'un mélange aléatoire mélangeant 1 poquet de la variété très sensible pour 5 poquets de la variété résistante (Figure 3 et 5). Il est à noter que dans le mélange aléatoire toutes les graines semées dans un même poquet étaient de la même variété. L'essai comprenait 4 répétitions et les parcelles élémentaires de 6 x 6 m étaient séparées entre elles par une bande de 4 m de la variété résistante pour limiter les risques d'interaction entre parcelles par transfert d'inoculum.

Dans cet essai, le niveau de pyriculariose a été particulièrement élevé car il était mené dans la station de sélection où nous utilisons des bordures infestantes de variétés sensibles pour exercer une pression de sélection pour la résistance à la pyriculariose. Néanmoins, les mélanges ont permis de réduire significativement la sévérité de la pyriculariose sur la variété sensible (Figure 6). Le niveau de dilution le plus fort, à savoir 1S:5R, semble plus efficace pour réduire la pyriculariose que ce soit dans le mélange en ligne ou le mélange aléatoire que la dilution 1S:1R. En revanche, aucune différence claire n'a été mise en évidence entre le mélange en ligne et le mélange aléatoire pour la dilution 1S:5R.

Dans un mélange variétal dans lequel une des variétés est résistante à toutes les souches de l'agent pathogène, les principaux mécanismes permettant de réduire l'impact de maladie sont l'effet de dilution par la distance entre les plantes sensibles et l'effet de barrière créé par cette variété résistante.

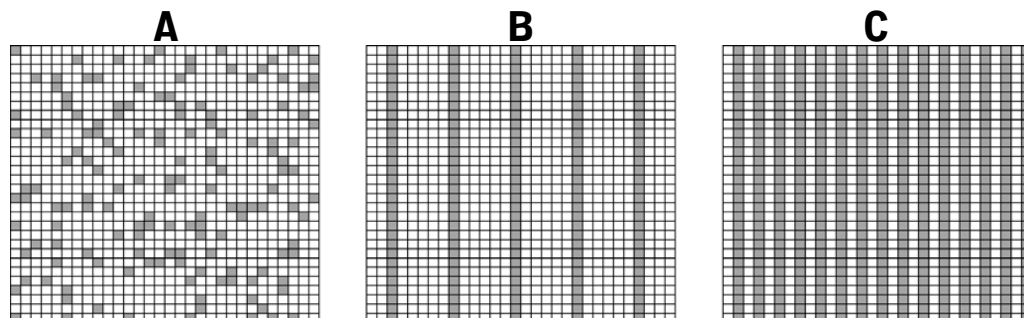


Figure 5 : Différentes modalités de mélange testées

(A) mélange aléatoire de 1 poquet de variété Sensible pour 5 poquets de variété Résistante (1S:5R)
(B) mélange en ligne avec 1 ligne de la variété Sensible pour 5 lignes de la variété Résistante (1S:5R)
(C) mélange en ligne avec 1 ligne de la variété Sensible pour 1 ligne de la variété Résistante (1S:1R)

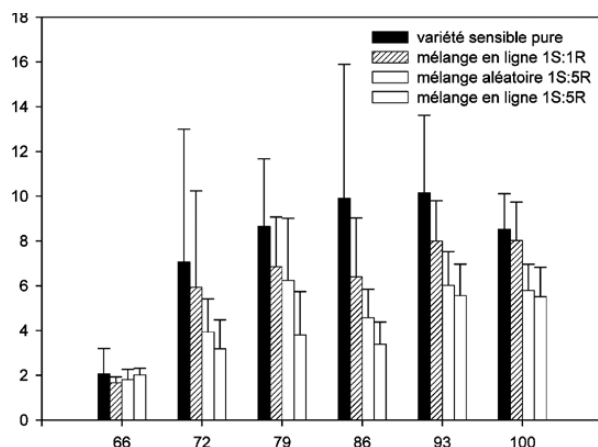


Figure 6 : Évolution de la sévérité de la pyriculariose sur feuille en fonction des différentes modalités de mélange (Raboin *et al.*, 2012)

COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LA PYRICULARIOSE DE MÉLANGES VARIÉTAUX A DEUX COMPOSANTES (1S:4R) IMPLIQUANT DIFFÉRENTES COMBINAISONS DE VARIÉTÉS

En 2011-2012, deux variétés sensibles (F154 très sensible et F152 sensible) ont été testées en combinaison soit avec une variété résistante (F172), soit avec une variété tolérante (Chhomrong Dhan = ChhD), une ligne de riz de la variété sensible étant intercalée toutes les 4 lignes de résistant. Chacune des quatre variétés a aussi été cultivée en culture pure. Sur la combinaison très sensible x résistant, un test d'orientation des lignes a été réalisé : la disposition avec des lignes perpendiculaires au vent dominant a été comparée avec celle constituée de lignes parallèles au vent dominant.

L'essai comprenait donc 9 traitements : F154/F172, F152/ChhD, F154/F172 « perpendiculaire au vent », F152/F172, F154 pure, F152 pure, ChhD pure, F172 pure et F154/F172 « sens du vent ».

Les Figures 7 et 8 résument les résultats des suivis de pyriculariose dans la culture pure, dans les mélanges avec F172 et dans les mélanges avec ChhD pour les deux variétés sensibles testées, F154 et F152 durant la campagne 2011-2012.

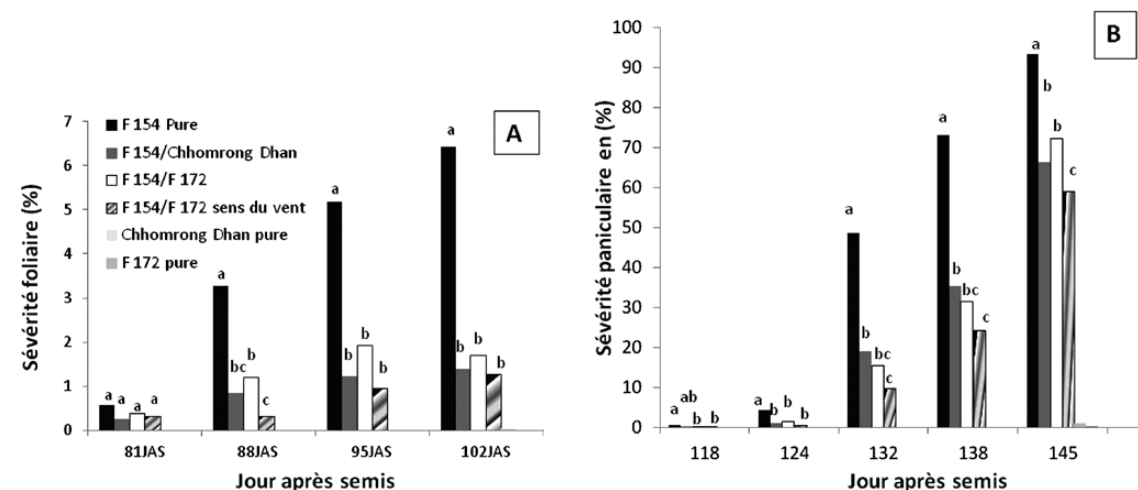


Figure 7 : Évolution de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) sur la variété F154 en mélange ou en pure et sur les variétés Chhomrong Dhan et F172 pures

A chaque date, les traitements portant la même lettre ne sont pas significativement différents (Rakotonandrasana, 2012)

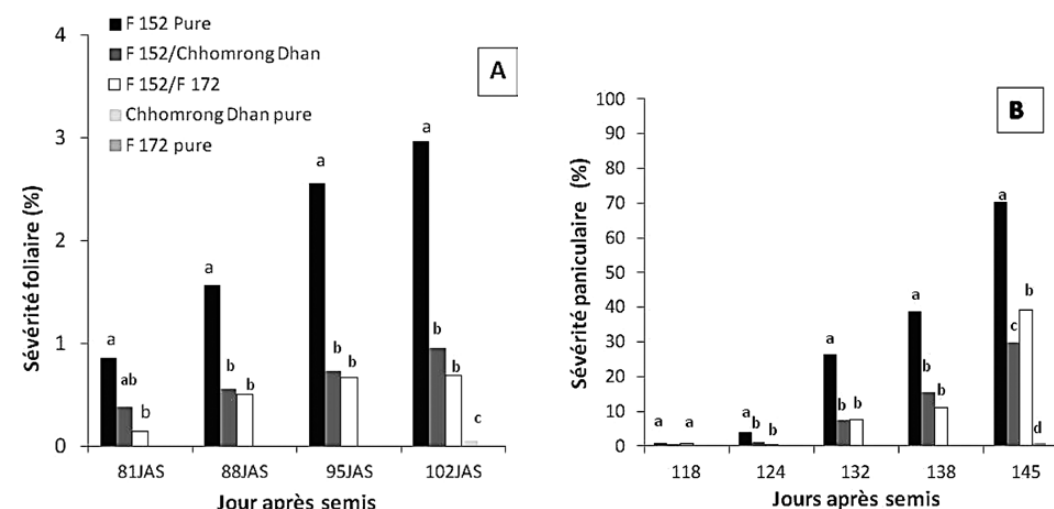


Figure 8 : Évolution de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) sur la variété F152 en mélange ou en pure et sur les variétés Chhomrong Dhan et F172 pures

A chaque date, les traitements portant la même lettre ne sont pas significativement différents (Rakotonandrasana, 2012)



La diminution de la sévérité est particulièrement spectaculaire pour la pyriculariose foliaire, pour les deux variétés sensibles, dans les mélanges par rapport à leur culture pure (réduction de 60 %). La diminution de la sévérité pour la pyriculariose paniculaire est également significative et très importante de la deuxième à l'avant-dernière date de notation (réduction de 50 à 60 % à 138 jours après semis). Pour la dernière date, si les différences semblent un peu s'atténuer, une attaque aussi tardive de pyriculariose aura un faible impact sur le rendement car les grains sont déjà en grande partie remplis. Le niveau de pyriculariose foliaire ou paniculaire n'est pas différent sur la variété sensible que ce soit en mélange avec F172 qui est totalement résistante ou en mélange avec ChhD qui est seulement tolérante (elle présente un faible niveau de maladie). En revanche, et c'était attendu, le niveau de pyriculariose est beaucoup plus élevé sur F 154 (très sensible) que sur F 152 (sensible) quels que soient les traitements observés.

Pour l'effet du sens des lignes, contrairement à nos attentes, il semble que les mélanges avec les lignes dans le même sens que le vent dominant ne sont pas particulièrement désavantagés par rapport aux mélanges classiques perpendiculaires au vent dominant. Cela peut-être dû au fait que le vent est très variable dans la zone donc la notion de vent dominant n'est pas particulièrement importante pour le choix de l'orientation des lignes.

Tableau 2 : Rendements en t/ha des variétés sensibles en mélange variétal et en pure campagne 2011-2012

Variété	Rendement
F 152 pure	0,7576 b
F 152/F 172	1,9875 a
F 152/Chhomrong Dhan	1,2785 ab
F 154 pure	0,1465 c
F 154/F 172	0,7379 a
F 154/Chhomrong Dhan	0,4841 b

Tableau 3 : Le rendement en t/ha des variétés résistantes en mélange variétal et en pure campagne 2011-2012

Variété	Rendement
F 172 pure	3,8565 a
F 152/F 172	4,2857 a
F 154/F 172	4,2401 a
ChhomrongDhan pure	4.1572 a
F 152/Chhomrong Dhan	5,0531 a
F 154/Chhomrong Dhan	4,5856 a

L'effet du mélange est significatif sur le rendement de chaque variété sensible : un meilleur rendement est obtenu sur les parcelles mélanges que sur les parcelles avec la variété sensible cultivée en pure (tableau 2). Pour F152, les mélanges (F152/F172 et F152/ChhD) ont des rendements équivalents mais significativement supérieurs à F152 pure. Pour F154, les trois modalités de traitement sont toutes différentes du point de vue rendement : la variété en pure a le rendement le plus médiocre (0.1465 t/ha) en relation avec la forte pression de pyriculariose, suivi de F154/ChhD (0.4841 t/ha) et le meilleur rendement est observé sur F154 en mélange avec F172 (0.7379 t/ha) (tableau 2). Ces classements reflètent la combinaison de l'effet de protection vis-à-vis de la pyriculariose dû au mélange qui est sensiblement du même ordre avec Chhomrong Dhan ou avec F 172 comme on l'a vu précédemment et de l'effet défavorable de la compétition qui est plus fort avec la variété Chhomrong Dhan qu'avec la variété F 172.

D'après le tableau 3, on constate que les rendements de la variété résistante F 172 et de la variété tolérante Chhomrong Dhan n'étaient pas significativement différents entre les parcelles en pure et en mélange. Néanmoins il faut relever que les rendements les plus faibles sont toujours dans les parcelles pures ce qui semble indiquer que la composante résistante bénéficie des relations de compétition avec la composante sensible des mélanges.

COMPARAISON DE L'IMPACT SUR LA PYRICULARIOSE D'UN MÉLANGE DE DEUX VARIÉTÉS DE RIZ (1S:4R) ET D'UNE ASSOCIATION INTERSPÉCIFIQUE RIZ-HARICOT

En 2012-2013, seule la variété très sensible a été conservée (F 154) et testée en mélange avec soit une variété résistante (F 172), soit une variété tolérante (F 173), mais aussi en association avec du haricot, afin d'évaluer la part de l'effet barrière exercé par la variété résistante de riz et le dissocier du simple effet d'éloignement des sensibles entre eux. Ces 4 traitements (F 154 pure, F154/F 172, F 154/173 et F 154/haricot) ont été testés dans deux conditions de fertilisation : fumier seul (Fu, Figure 7), proche des conditions paysannes, ou fumier + fertilisation minérale (fertilisation habituelle (FM, Figure 9). Des notations dynamiques de pyriculariose ont été réalisées sur feuilles et sur panicules. Les composantes du rendement à la récolte ont aussi été évaluées.

D'après la Figure 9, l'effet du mélange sur l'évolution des épidémies de pyriculariose a de nouveau été très important en 2012-2013. La pyriculariose foliaire est réduite d'environ 60 % à la dernière date de notation alors que la pyriculariose paniculaire est réduite d'environ 50 % à l'avant dernière date. Les différences entre les modalités de mélange sont toujours très minimes, même si la variété F 173 n'est pas complètement

résistante à la pyriculariose. En revanche le niveau de pyriculariose était significativement plus faible sur F 154 en association avec le haricot à la dernière date d'évaluation sur panicules. Il faut remarquer que les conditions microclimatiques sont probablement différentes dans l'association et dans le mélange. Le riz étant plus haut que le haricot. Les panicules de la variété sensible de riz sont donc plus exposées au vent et au soleil dans l'association que dans le mélange ce qui doit diminuer le niveau d'humidité et pourrait contribuer à diminuer l'impact de la pyriculariose.

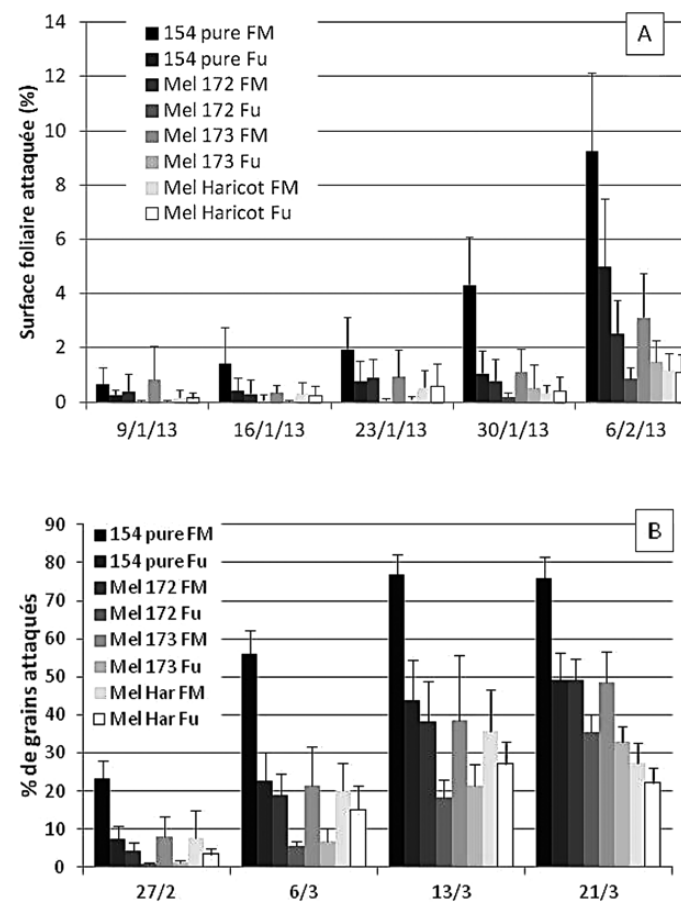


Figure 9 : résultats des suivis dynamiques de la pyriculariose foliaire (A) et paniculaire (B) pour la variété F154 cultivée en pure ou en mélange avec F172, F173 ou en association avec du haricot

Les barres représentent l'erreur standard

Fu : Fumier seul
FM : Fumier + fumure Minérale

Tableau 4 : Résultats des analyses statistiques de la sévérité paniculaire de la pyriculariose et des composantes du rendement mesurées à la récolte sur la variété F154 en fonction des conditions de sa croissance en 2012-2013

	Nombre de parcelles	Rendement F154 (sensible)	Classement des moyennes	Severité au niveau parcelle	Nb plants (10 poquets)	Nb talles (10 poquets)	Nb talles fertiles (10 poquets)	Nb epillets par m²	Taux de fertilité	Poids de mille grains	Nb grains par panicule	Rendement autre composante
Moyennes par type de mélange												
F 154/F 172	9	1186	a	41	53	211	136	12571	44,3	26.0	36.8	3521
F 154/Haricot	9	1142	a	25	53	227	181	17260	34,8	25.6	37.7	1374
F 154/F 173	9	958	a	39	43	178	117	10933	44,8	25.1	38.5	5960
F 154 pure	9	256	b	60	55	230	144	11446	19,2	19.1	32.5	-
Moyennes par type de fumure												
Avec fumure minérale	811	50	53	224	149	50	12741	30.7	24.3	34.3	-	
Sans fumure minérale	945	35	49	201	141	35	13302	39.8	24.2	38.0	-	
Test des facteurs évalués												
Effet du mélange	****	****	*	**	****	*	****	*	****	*	ns	-
Effet de la fumure	ns	****	ns	**	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	-
Interaction	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-

****, ***, ** et * respectivement significatifs aux seuils de 0.0001, 0.001, 0.01 et 0.05.
ns : nonsignificatif.

D’après le Tableau 4, le mélange a un effet hautement significatif sur le rendement de la variété F 154 qui passe d’une moyenne de 256 kg/ha en culture pure à 1186 kg/ha en mélange avec F 172. L’association avec le haricot a les mêmes conséquences sur le rendement que la culture en mélange de variétés. Cet effet est lié à la fertilité qui est nettement améliorée en mélange (de 19,2 % de grains pleins à 44,3 % en mélange avec F 172) mais aussi par un meilleur remplissage des grains visibles (augmentation du PMG = poids de mille grains). Si l’on compare les deux variétés de riz pluvial qui ont été associées à F 154, on constate qu’elles ont le même effet bénéfique sur F 154 mais F 173 est nettement plus productive que F 172. Dans les associations avec le haricot, la variété sensible se développe mieux car il y a moins de compétition. A l’inverse dans le mélange avec F173 la compétition est défavorable à F154 (en nb de talles et nb épillets par m²).

Contrairement à ce que l’on aurait pu attendre du fait de la moindre sévérité de la pyriculariose et du meilleur développement du riz dans l’association avec le haricot, le rendement obtenu sur la variété sensible n’est pas meilleur que dans les mélanges avec F173 et F172. Ce résultat est sûrement dû à un

changement du microclimat autour de la ligne sensible qui est plus exposée, ce qui est probablement défavorable au développement de la pyriculariose comme on l’a évoqué plus haut mais peut provoquer une augmentation de la stérilité liée au froid (10 points de fertilité en moins de F154 en association avec le haricot par rapport à cette même variété en mélange avec F173 et F172 alors qu’il y a moins de pyriculariose).

Biodiversité et pyriculariose en milieu réel

ÉTAT DE LA DIVERSITÉ VARIÉTALE
DU RIZ PLUVIAL SUR LES HAUTES TERRES

La riziculture pluviale d’altitude a connu un développement extrêmement rapide, en particulier dans la région du Vakinankaratra, entre les villes d’Antsirabe et d’Ambatolampy (70 km au Nord), où les efforts de recherche et de diffusion se sont concentrés. Deux enquêtes réalisées à 6 ans d’intervalle dans seize villages du Vakinankaratra situés au dessus de 1250 m, ont permis de mesurer cette progression. En 2011, 71 % des paysans pratiquaient la riziculture pluviale alors qu’ils n’étaient que 32 % en 2005 (Raboin *et al.*, 2014). Avant la diffusion des premières variétés tolérantes au froid en 1995, la culture du riz pluvial était même inexistante à ces altitudes.

L’absence de variétés de riz pluvial suffisamment tolérantes au froid pour être cultivées à des altitudes supérieures à 1 250 m, a conduit au milieu des années 80 au lancement d’un programme de création variétale ciblant cette écologie. Le partenariat qui s’est développé entre le centre national de recherche appliqué au développement rural (FOFIFA) et le centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) pour atteindre cet objectif, se poursuit encore aujourd’hui.

Une quinzaine de variétés de riz pluvial tolérantes au froid ont ainsi été sélectionnées et proposées à la diffusion (Tableau 4). Elles ont permis de repousser la frontière de la culture du riz pluvial au-delà de 1800 m d’altitude (Raboin *et al.*, 2013).

Les premières variétés issues du programme de sélection ont permis le démarrage de la culture du riz pluvial en altitude. Mais le paysage des variétés utilisées par les paysans a été complètement bouleversé entre 2005 et 2011 (Tableau 5). En 2005, les variétés les plus cultivées étaient FOFIFA 154 (53 % d’utilisateur), FOFIFA 133 (21 % d’utilisateur), FOFIFA 134 (10 % d’utilisateurs) et FOFIFA 152 (7 % d’utilisateurs). En 2011, la variété Chhomrong Dhan était devenue de loin la plus cultivée avec 88.4 % d’utilisateurs et 82,5 % des surfaces consacrées à la riziculture pluviale.

Les premières variétés FOFIFA 152, FOFIFA 154, FOFIFA 133 et FOFIFA 134 n’étaient plus utilisées que par 15.4 %, 7.6 %, 2.6 % et 0.3 % des utilisateurs, respectivement. Ces premières variétés sont toutes devenues sensibles à la pyriculariose. FOFIFA 152, qui reste utilisée par les paysans, est la moins sensible d’entre elles. Le renouvellement variétal s’est fait au profit presque exclusif de la variété Chhomrong Dhan qui devient hégémonique dans le paysage. Chhomrong Dhan est une variété irriguée d’origine népalaise introduite à Madagascar comme parent pour réaliser des croisements dans le cadre du programme de création variétale mais qui a montré une très bonne adaptation à la culture pluviale en altitude. Elle a donc été sélectionnée et diffusée à partir de 2006.



Tableau 5 : Pourcentage des paysans qui utilisent chacune des variétés de riz et pourcentage de la surface totale en riz pluvial de chaque variété selon les enquêtes conduites en 2005-2006 et 2011-2012. (Raboin *et al.*, 2014)

Nom de la variété	Début diffusion	% des paysans enquêtés en 2005-2006	% des paysans en 2011-2012	% des surfaces en 2011-2012
FOFIFA 133	1994	21	2.6	1.9
FOFIFA 134	1994	10	0.3	0.5
FOFIFA 151	1995	0	0	0
FOFIFA 152	1995	7	15.4	8.5
FOFIFA 153	1995	0	0	0
FOFIFA 154	1995	53	7.6	3.7
FOFIFA 157	2000	0	0	0
FOFIFA 158	2000	0	0	0
FOFIFA 159	2000	0	1.5	0.5
FOFIFA 161	2003	0	2.6	1.2
FOFIFA 167	2005	-	0	0
FOFIFA 168	2005	-	0	0
FOFIFA 169	2005	-	0	0
FOFIFA 171	2006	-	0	0
FOFIFA 172	2006	-	0.3	0.1
Chhomrong Dhan	2006	-	88.4	82.5

L'expansion de la riziculture pluviale repose donc maintenant sur la culture d'une variété ultra dominante. Cette faible diversité génétique augmente la vulnérabilité de la riziculture pluviale aux maladies, agresseurs et même aux stress abiotiques. Il est donc indispensable de diversifier l'offre de variétés et de proposer de nouvelles stratégies pour optimiser l'utilisation de cette diversité à l'échelle des parcelles ou du paysage.

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES POPULATIONS DE PYRICULARIOSE À Madagascar

L'amélioration variétale dépend largement de la connaissance de la variabilité du pouvoir pathogène et de la diversité génétique des populations de *M. oryzae*. Les populations de *M. oryzae* de Madagascar ont déjà fait l'objet de différentes études. Notteghem (1983) a utilisé quelques souches collectées sur la riziculture à Madagascar pour différents tests de maîtrise de la culture de *M. oryzae* et d'inoculation artificielle du riz. Deux populations collectées à Andranomanelatra en 2004 et en 2005, composées de 67 et 88 isolats de *M. oryzae*, ont été caractérisées avec 18 marqueurs moléculaires microsatellites (Adreit *et al.*, 2007). Andriantsimalona et Tharreau (2008) ont comparé des souches de *M. oryzae* provenant de riz irrigués et de riz pluviaux et collectées dans le Vakinankaratra. Leurs résultats montrent que les souches de riz pluvial semblent résulter d'une adaptation génétique des souches de riz irrigué.

Saleh *et al.*, (2013) ont étudié la diversité génétique de 55 populations de *M. oryzae* venant de 15 pays dans le monde. Leurs résultats montrent que les populations de *M. oryzae* de Madagascar sont plus proches des populations d'Indonésie.

Les suivis de réponse de variétés différentielles vis-à-vis de populations naturelles de pyriculariose ont été effectués durant les campagnes 2012-2013 et 2013-2014. Les réactions de ces variétés sont présentées dans le Tableau 6 et montrent que 10 sur les 18 variétés différentielles en 2013 et 8 sur les 18 variétés différentielles en 2014, ont des réponses sensibles vis-à-vis des populations de souches existantes aux alentours du dispositif, ce qui montre qu'un grand nombre de gènes de résistance à la pyriculariose sont déjà contournés par les souches de *Magnaporthe* présentes à Madagascar.

Tableau 6 : Réaction des variétés différentielles vis-à-vis des populations naturelles de pyriculariose

Lieu de suivi		Andranomanelatra	
Année de suivi		2013	2014
Variété	Gène de résistance	Sensibilité à la pyriculariose	
Co 39	<i>Témoin</i>	S	S
C104 lac	<i>Pi 1</i>	S	S
Zenith Acc32558	<i>Pi(a + z)</i>	S	S
Kanto 51	<i>pik</i>	S	S
K3	<i>Pikh</i>	S	S
K60	<i>Pikp</i>	S	S
K2	<i>Pikp + a</i>	S	S
K59	<i>Pit</i>	S	S
Fukunishiki	<i>Pish + z</i>	S	R
K1	<i>Pita</i>	S	R
C101 A51	<i>Pi2 = Piz5</i>	R	R
Fujisaka N°5	<i>Pi1 + ks</i>	R	R
IR 1529	<i>Pi33</i>	R	R
Pi n°4	<i>Pita2</i>	R	R
Toride 1	<i>Pizt</i>	R	R
75-1-127	<i>Pi 9</i>	R	R
C101 lac	<i>Pi(1 + 1b + 33)</i>	R	R
CT 13432-3R	<i>Pi(1 + 2 + 33)</i>	R	R

IMPACT DE LA PYRICULARIOSE SUR LA VARIÉTÉ CHHOMRONG DHAN EN MILIEU PAYSAN

Chhomrong Dhan est la variété la plus cultivée par les paysans en riziculture pluviale sur les Hautes Terres de la région du Vakinankaratra. Cependant, cette variété n'est pas complètement résistante à la pyriculariose. La présence de symptômes sur cette variété durant la campagne 2011-2012 sur les essais expérimentaux, nous a conduit à faire des suivis de niveau d'attaque de pyriculariose sur cette variété en milieu réel.

Durant la campagne 2012-2013, 82 parcelles paysannes cultivées avec la variété Chhomrong Dhan ont été suivies pour la pyriculariose foliaire. Les observations ont montré que des symptômes ont été relevés dans 12 parcelles sur les 82 visitées mais avec des sévérités très faibles en général. Concernant la pyriculariose paniculaire, en focalisant sur les sites où la présence d'attaque foliaire est importante, 21 parcelles paysannes ont été suivies. Seulement 5 parcelles paysannes présentaient une attaque de pyriculariose paniculaire. Une de ces parcelles paysannes présentait une sévérité paniculaire de 7,87 % ce qui est un niveau d'attaque important pour cette variété.

Toutes ces parcelles sont réparties dans 16 sites dans la région du Vakinankaratra, la Figure 10 présente la présence d'attaque de pyriculariose sur la variété Chhomrong Dhan dans ces sites. Des attaques de pyriculariose plus ou moins élevées ont été recensées sur 3 sites suivis. Six sites présentaient des symptômes de la maladie mais les nombres de lésions relevés étaient très faibles ; la sévérité était donc pratiquement nulle. Sur le reste des sites, aucune attaque de pyriculariose n'a été observée. Globalement, le niveau d'attaque de pyriculariose sur cette variété reste faible mais il faudra surveiller l'évolution de la sévérité en milieu paysan sur cette variété au cours du temps.

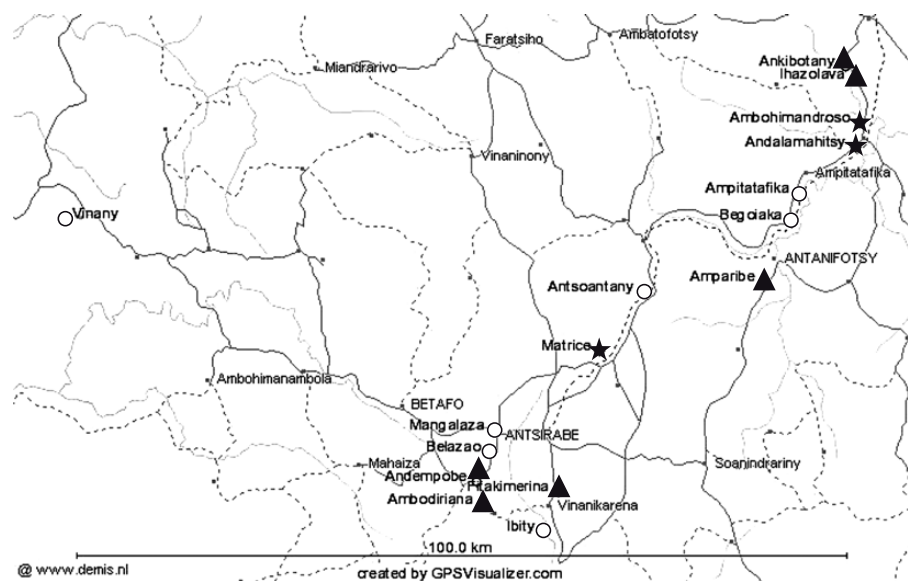


Figure 10 : Pyriculariose sur la variété Chhomrong Dhan dans les 16 sites suivis en milieu réel campagne 2012-2013

Sites ○ : absence d'attaque de pyriculariose sur les parcelles suivies, sites ▲ : présence de symptômes de pyriculariose au moins sur une de parcelle suivie sur la variété mais sans notation, et sites ★ : parcelles infectées avec notation de sévérité de la pyriculariose

EFFET DES MÉLANGES VARIÉTAUX EN MILIEU PAYSAN

Résultats de la campagne 2011-2012

Durant la campagne 2011-2012, des tests en milieu réel du mélange variétal (1S:4R) de F 154 (sensible) et de F 172 (résistante) comparé avec F 154 pure ont été conduits. 20 dispositifs ont été mis en place dans la région du Vakinankaratra. Des notations de pyriculariose foliaire et paniculaire ont été faites en suivant le même principe de mesure que celui effectué en dispositif expérimental. D'après les suivis, 10 dispositifs

installés en milieu paysan ont montré des symptômes de pyriculariose. Les attaques variaient de 0,001 % à 3,15 % de surface foliaire nécrosé, et de 0,09 % à 75,80 % de grains malades. Ces niveaux d'infestation sont généralement beaucoup plus faibles que ceux observés en milieu contrôlé. Ceci peut s'expliquer par la faible utilisation d'intrants en milieu paysan, notamment l'azote, qui est connu pour favoriser la maladie. En présence d'attaque de pyriculariose, il a été trouvé que les parcelles cultivées en pure sont plus touchées par la maladie que les parcelles cultivées en mélange (Figure 11). Le niveau de sévérités foliaire et paniculaire dans le dispositif 7 le plus attaqué illustre bien cette différence. Dans ce dispositif, la sévérité de la pyriculariose foliaire sur F 154 est de 3,15 % pour la parcelle cultivée en pure et 1,21 % pour la parcelle cultivée en mélange. La sévérité de la pyriculariose paniculaire sur F 154 est de 75,80 % pour la parcelle cultivée en pure et 34,93 % pour la parcelle cultivée en mélange. La même tendance de réduction d'attaque de la pyriculariose dans les parcelles en mélange est observée dans tous les dispositifs touchés par la maladie.

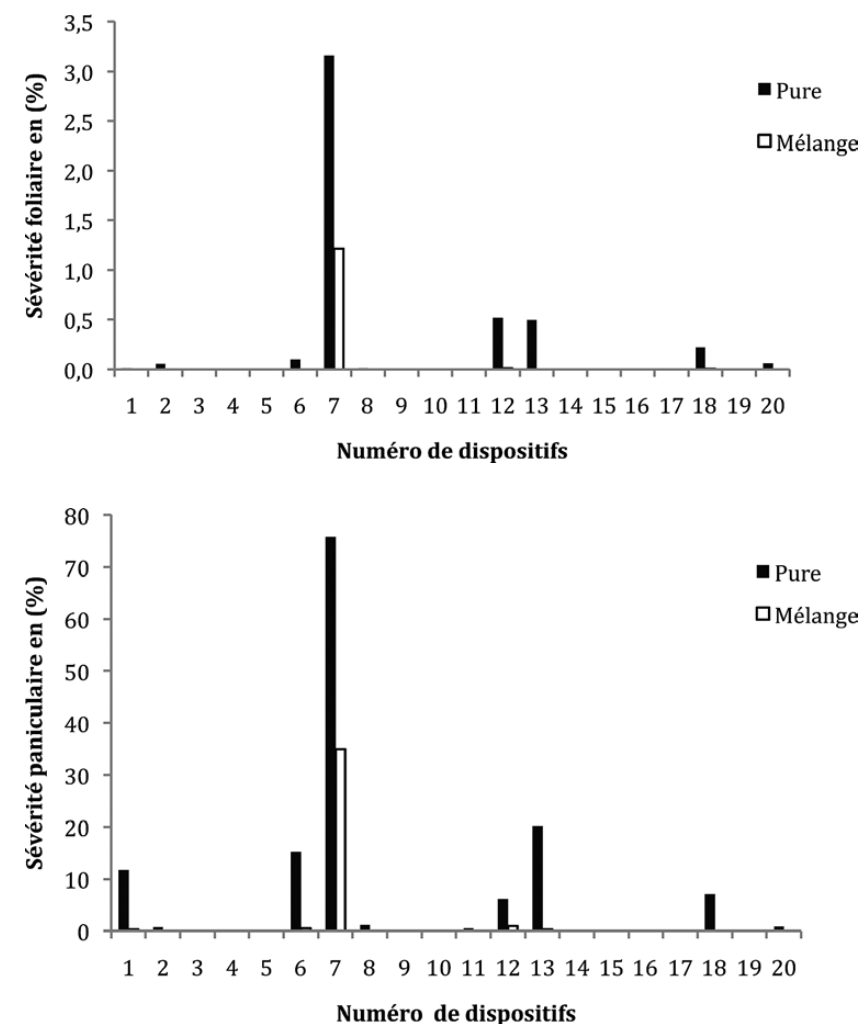


Figure 11 : Sévérité de la pyriculariose foliaire (haut) et paniculaire (bas) sur F 154 cultivé pure ou en mélange F 154/F 172 dans les dispositifs en milieu paysan en 2011-2012



Mélange variétal en milieu paysan campagne 2012-2013T

Durant la campagne 2012-2013, des tests du mélange variétal (1S:4R) de F 154 (très sensible) et de F 173 (tolérante) comparé avec F 154 pure ont été conduits en milieu réel. Vingt dispositifs ont été mis en place dans la région du Vakinankaratra mais l'un d'entre eux n'a pas été suivi. Des notations de pyriculariose foliaire et paniculaire ont été faites dans les 19 dispositifs. Les résultats de sévérité de la maladie sont représentés dans la Figure 12. Parmi les 19 dispositifs suivis, 9 ont montré de symptômes de pyriculariose foliaire et 8 ont montré de symptômes de pyriculariose paniculaire. L'efficacité de mélange variétal a été confirmée durant cette campagne même en utilisant une variété tolérante. Les parcelles cultivées en pure présentaient toujours un niveau d'attaque de pyriculariose plus élevé par rapport aux parcelles cultivées en mélange sur la variété sensible.

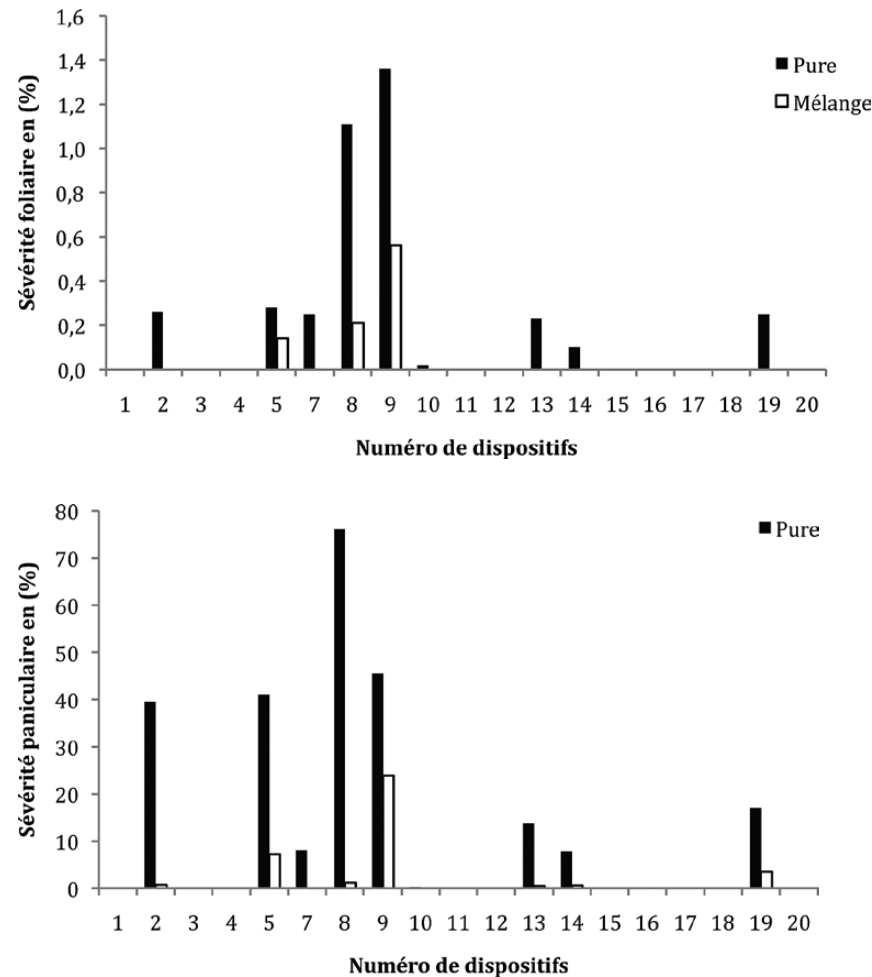


Figure 12 : Sévérité de la pyriculariose foliaire (haut) et paniculaire (bas) sur F 154 cultivé pure ou en mélange F 154/F 173 dans les dispositifs en milieu paysan en 2012-2013

La pyriculariose se trouve un peu partout dans les zones rizicoles de la région du Vakinankaratra mais avec un taux d'infestation relativement faible ce qui confirme l'enquête réalisée sur Chhomrong Dhan (ci-dessus).

Les résultats ont montré clairement que le mélange variétal réduit le niveau de maladie sur la variété sensible mélangée avec une variété résistante dans les conditions paysannes. Toutefois, cet effet du mélange sur la maladie ne s'est pas traduit par un effet mesurable sur les rendements à cause de la grande variabilité des conditions en milieu paysan.

APPRÉCIATION DES PAYSANS SUR LES MÉLANGES VARIÉTAUX

Une enquête post-récolte a été menée pour connaître l'avis des paysans sur ces expérimentations. Les résultats sont très intéressants car l'expérimentation a permis de valider que le mélange variétal diminue la sévérité foliaire et paniculaire de la pyriculariose sur une variété sensible dans les conditions des petites exploitations paysannes.

Cependant son adoption en milieu réel se trouve encore confrontée à plusieurs obstacles. D'une part, l'impact de l'atténuation de l'épidémie par le mélange variétal ne se reflète pas sur le rendement, alors que le rendement est le principal souci des paysans. D'autre part, le mélange variétal rencontre quelques problèmes pratiques, notamment à cause de la différence de longueur de cycle entre les variétés du mélange (cas de F154 précoce et F173 tardive) ce qui complique la récolte selon les paysans enquêtés.

La concurrence éventuelle entre les deux variétés a aussi été évoquée. Par ailleurs, dans les enquêtes post-récoltes il a aussi été constaté que les paysans apprécient plus la variété tolérante FOFIFA 173 (100 % des paysans enquêtés) que la variété sensible FOFIFA 154 (44 % des paysans enquêtés). La variété tolérante a donné un rendement significativement meilleur que la variété sensible. Les paysans se demandaient alors pourquoi cultiver une variété moins productive et sensible à la pyriculariose. Le concept de « diversification génétique pour une résistance plus durable » est encore assez difficile à comprendre pour les paysans.

Conclusion et perspectives

Le développement et l'extension rapide de la riziculture pluviale dans certaines régions de Madagascar permettraient de contribuer à l'augmentation de la production du riz. Cependant, la pyriculariose, maladie fongique causée par un champignon appelé *Magnaporthe oryzae*, est une menace permanente pour le riz pluvial. Le projet GIPYRI/PARRUR a apporté de nouveaux éléments qui devraient contribuer à améliorer les stratégies de lutte contre cette maladie.

La construction et la mise en œuvre d'un nouveau laboratoire de phytopathologie à la Station Régionale de Recherche d'Antsirabe a permis de mettre au point la technique d'inoculation artificielle qui permettra à la fois d'étudier la diversité des populations de l'agent pathogène de la pyriculariose et de mieux caractériser la résistance de variétés. Ces informations seront précieuses à l'avenir pour le programme d'amélioration génétique du riz pluvial et pour optimiser les choix de variétés à associer dans les mélanges.



L'effet des mélanges de variétés sur la diminution des épidémies de pyriculariose a été bien confirmé au cours de ce projet aussi bien en conditions contrôlées qu'en conditions paysannes. Il a été montré que l'utilisation d'une variété tolérante a un effet comparable à celui d'une variété résistante dans un mélange binaire avec une variété sensible. Il a été aussi montré qu'une association interspécifique (riz et haricot) peut avoir un effet au moins aussi fort sur la diminution de la pyriculariose qu'un mélange de variétés de riz pour un niveau de dilution identique de la variété sensible. Néanmoins, pour le moment les modèles expérimentaux que nous avons testés étaient des mélanges simples à deux variétés (une résistante ou tolérante avec une sensible). Les variétés sensibles utilisées (F 152 ou F 154) bien qu'ayant été appréciées par le passé pour leur type de grain et leur goût sont désormais beaucoup moins performantes (indépendamment de leur sensibilité à la pyriculariose) que les variétés nouvelles tolérantes à la pyriculariose proposées aux paysans. Les paysans des Hautes Terres ne voient donc pas vraiment l'intérêt d'utiliser ces variétés anciennes y compris dans un mélange, le rendement restant leur objectif numéro et, visent avant tout l'autosuffisance en riz. Le concept et l'approche restent toutefois pertinents et doivent être explorés dans le cadre de mélanges plus complexes avec des variétés ayant toutes un niveau agronomique élevé et bien caractérisées sur le plan de leur résistance. Les mélanges variétaux pourraient permettre de sécuriser la culture du riz pluvial en stabilisant les rendements face aux aléas climatiques et à la pression des pathogènes. Toutefois, toutes les associations de variétés ne sont pas nécessairement bénéfiques ; il existe des phénomènes de concurrence et d'incompatibilité qui peuvent conduire à des interactions défavorables entre les variétés. Ces questions doivent aussi être abordées par la recherche. Enfin, les mélanges variétaux devraient être assez faciles à mettre en œuvre dans le cas d'une petite agriculture familiale où la plupart des opérations culturales sont manuelles.

Remerciements

Ce projet « gestion Intégrée de la pyriculariose du riz pluvial sur les Hautes Terres de Madagascar » est entièrement financé par le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) Partenariat et Recherche dans le secteur RURAL (PARRUR), géré par le service de coopération et d'action culturelle de l'Ambassade de France à Madagascar.

Ce projet a été mené par différents acteurs : sélectionneurs, phytopathologistes, épidémiologistes et des ingénieurs en collaboration avec des paysans. Il comportait cinq équipes complémentaires permettant de mettre en œuvre les travaux de recherche et de développement proposés et d'assurer un encadrement scientifique :

- Equipe Systèmes de Culture et Rizicultures Durables (SCRiD) CIRAD-FOFIFA à Antsirabe, Madagascar, coordinatrice du projet, a conduit les recherches sur le terrain en s'appuyant sur son dispositif d'expérimentation agronomique au champ basé à Andranomanelatra. Elle a assuré les suivis épidémiologiques et la caractérisation des résistances des variétés et des populations de l'agent pathogène. L'équipe a fourni les variétés de riz pluvial adaptées à la haute altitude et utilisées dans ce projet.
- Unité Mixte de Recherche Biologie et Génétique des Interactions Plantes-Parasites (UMR-BGPI) à Montpellier, France, a assuré l'encadrement scientifique et l'accueil en formation sur l'inoculation artificielle du riz par l'agent pathogène de la pyriculariose ;
- Unité Mixte de Recherche BIOlogie et GEstion des Risques en Agriculture-Champignons Pathogènes des plantes (UMR BIOGER-CPP) à Grignon, France, a assuré l'encadrement scientifique ;

- Projet Bassins Versants et Périmètres Irrigués dans le Sud-Est et sur les Hauts Plateaux (Projet BVPI SE/HP) à Antsirabe, Madagascar, a conduit la mise en place et le suivi des essais de mélanges variétaux multi-locaux en conditions paysannes ;
- Département de diffusion Fiompiana Fambolena Malagasy Norveziana (FIFAMANOR) à Andranomanelatra, Madagascar, a conduit la mise en place et le suivi des essais de mélanges variétaux multi-locaux en conditions paysannes.

Références bibliographiques

- Adreit H., Santoso, Andriantsimalona R.D., Utami D.W., Notteghem J-L., Lebrun M.H. and Tharreau D. 2007 : Microsatellite markers for population studies of the rice blast fungus, *Magnaporthe grisea*. *Molecular Ecology Notes*. doi: 10-1111/j.1471-8286.2006.01672.x.
- Agrios G.N. 2005 : Genetics of plant diseases (Plant Pathology 5th edition), *Elsevier Academic press*. pp: 124-174.
- Andriantsimalona R.D. and Tharreau D. 2008 : Evolution of *Magnaporthe grisea* populations and adaptation to upland rice in the Vakinankaratra region of Madagascar. ENDURE International Conference 2008 *Diversifying crop protection*, 12-15 october 2008. La Grande-Motte, France.
- Ballini E., Morel J-B., Droc G., Price A., Courtois B., Notteghem J-L. and Tharreau D. 2008 : A genome-wide meta-analysis of rice blast resistance genes and QTLs provides new insights into partial and complete resistance. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 21: 859-868.
- Castilla N.P., Willocquet L., Suwarno S., Santoso S., Nasution A., Sulaeman Y., Savary S. and Vera Cruz C.M. 2010 : Assessing the effect of resistant-susceptible associations and determining thresholds for associations in suppressing leaf and neck blast of rice. *Crop protection* 29: 390-400.
- DPV., GTZ., 1990 : Pyriculariose du riz/ Menalavitra, *Fiche technique de la protection des cultures*, Fiche N°2. 5p.
- Ebbola D.J. 2007 : *Magnaporthe* as a model for understanding host-pathogen interactions. *Annual Review of Phytopathology*. 45: 437-456.
- Finckh M.R., Gacek E.S., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C.C., Munk L., Nadziak J., Newton A.C., De Vallavieille-Pope C., Wolfe M.S. 2000 : Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* 20: 813-837.
- Flor H.H. 1971 : Current status of the gene-for-gene concept. *Annual Review of Phytopathology*, 9, 21.
- Lai X.H., Marchetti M.A. and Petersen H.D. 1999 : Comparative slow-blasting in rice grown under upland and flooded blast nursery culture. *Plant Disease* 83: 681-684.
- McDonald B.A. and Linde C. 2002 : Pathogen population genetics, evolutionary potential, and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology*. 40: 349-379.
- Mundt C. C. 2002 : Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology* 40: 381-410.
- Notteghem J-L. 1983 : *Définition d'une stratégie d'utilisation de la résistance par analyse génétique des relations hôte-parasite*. Cas du couple riz-*Pyricularia oryzae*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay.
- Ou S.H. 1985 : « Blast ». In : S.H. Ou, *Rice Diseases* 2nd edition. Commonwealth Agricultural Bureaux., Slough, UK. p 109-201
- Pennisi E. 2010 : Armed and dangerous. *Science* 327: 804-805.

Raboin L-M., Randriambololona T., Radanielina T., Ramanantsoanirina A., Ahmadi N. and Dusserre J. 2014 ;Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research*, 169: 11-20.

Raboin L-M., Ramanantsoanirina A., Dusserre J., Razasolofonahary F., Tharreau D., Lannou C. and Sester M., 2012 : Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology* 61 (6): 1103-1111.

Raboin L-M., Randriambololona T., Radanielina T., Ramanantsoanirina A., Ahmadi N. and Dusserre J. 2014 ;Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands. *Field Crops Research*, 169: 11-20.

Rakotonandrasana, O. M. 2012 : *Impact des mélanges variétaux sur la pyriculariose du riz pluvial cas de la région du Vakinankaratra*. Mémoire de fin d'étude du second cycle. Institut Supérieur Polytechnique de Madagascar. 82 p.

Randriamanantsoa R., Aberlenc H.P., Ralisoa O.B., Ratnadass A. et Vercambre B., 2010 : Les larves des Scarabaeoidea (*Insecta, Coleoptera*) en riziculture pluviale des régions de haute et moyenne altitudes du Centre de Madagascar. *Zoosystema* 32 : 19-72.

Raveloson H., Tharreau D. et Sester M. 2013 : *Les sources d'inoculum primaire de la pyriculariose. Rôle des semences et des pailles infectées dans le développement des épidémies*. 3^e Congrès du riz en Afrique du 21 au 24 octobre 2013 Yaoundé, Cameroun. 9 p.

Ribot C., Hirsch J., Balzergue S., Tharreau D., Nottéghem J.L., Lebrun M.H. and Morel J.B. 2008 : Susceptibility of rice to the blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *Plant Physiology*. 165 (1): 114-24.

Roy Chowdhury M., Jia Y., Jia M. H., Fjellstrom R. and Cartwright R. D. 2012 : Identification of the rice blast resistance gene Pib in the National Small Grains Collection. *Phytopathology* 102: 700-706.

Saleh D., Milazzo J., Adreit H., Fournier E., and Tharreau D., 2013 : South-East Asia is the center of origin, diversity and dispersion of the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *New Phytologist*.

Sesma A. and Osbourne A.E. 2004 : The rice leaf blast pathogen undergoes developmental processes typical of root infecting fungi. *Nature* 431: 582-586.

Sester M., Raboin L.M., Ramanantsoanirina A. and Tharreau D. 2008 : Toward an integrated strategy to limit blast disease in upland rice. *Endure international conference*. Diversifying crop protection. 12-15 October 2008. La Grande Motte, France. 4p.

Sester M., Raveloson H., Tharreau D. and Dusserre J. 2014 : Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathology* 63: 373-381.

Skamnioti P. and Gurr S.J. 2009 : Against the grain : safeguarding rice from rice blast disease. *Trends in Biotechnology* 27 (3): 141-150.

UPDR/FAO, 2001 : *Diagnostic et perspectives de développement de la filière riz Madagascar*. FAO/RAFP, Antananarivo.

Valent, B., 1990 : Rice blast as a model system for plant pathology. *Phytopathology*, 80(1), 33-36.

Wolfe M S. 1985 : The Current Status and Prospects of Multiline Cultivars and Variety Mixtures for Disease Resistance. *Annual Review of Phytopathology* 23: 251-273.

Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y., Chen J. et al., 2000 : Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406: 718-722.

Zhu Y., Fang H., Wang Y.Y., Fan J.X., Yang S.S., Mew T.W., Mundt C.C. 2005 : Panicle blast and canopy moisture in rice cultivar mixtures. *Phytopathology* 95 : 433-438.

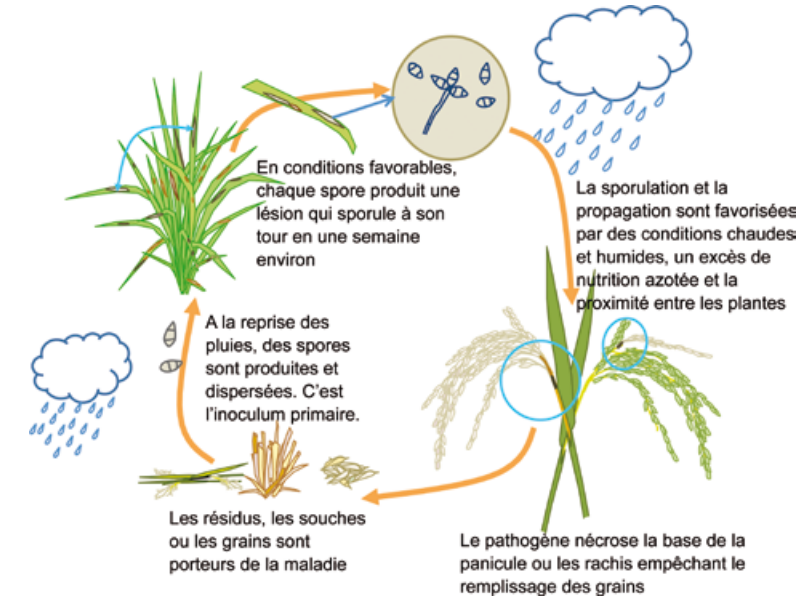


Figure 1 : Cycle épidémique de la pyriculariose (Source : DPV-GTZ)

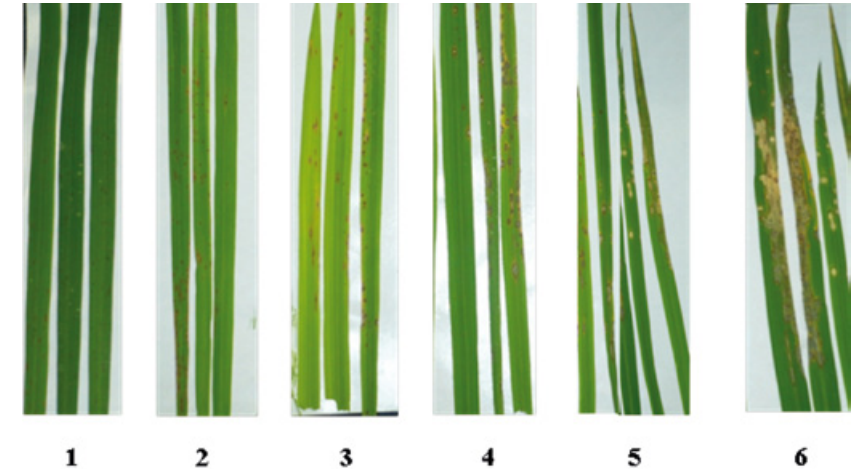


Figure 2 : Echelle de notation des symptômes 7 à 10 jours après l'inoculation en utilisant une échelle de 1 à 6

- 1 : Pas de symptôme ou apparition de décolorations ponctuelles
 - 2 : Présence de nombreuses ponctuations brunes
 - 3 : Présence de lésions à centre différencié de moins de 1 mm de diamètre
 - 4 : Présence de lésions à centre différencié de moins de 2 mm de diamètre
 - 5 : Présence de lésions à centre différencié de plus de 2 mm de diamètre
 - 6 : Apparition de grandes lésions à contour non délimité par une bordure brune.
- (1 à 2 : Variété résistante ; 3 à 4 : Variété moyennement résistante ou sensible ; 5 à 6 : Variété sensible).



(A) Symptômes caractéristiques de la pyriculariose foliaire du riz : lésions fusiformes à centre gris et bord marron foncé



(B) Symptôme caractéristique de la pyriculariose paniculaire avec une nécrose à la base de la panicule qui se dessèche

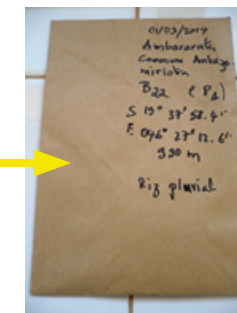


(C) Dispositif expérimental permettant de comparer le développement de la maladie sur une variété sensible cultivée en mélange (au premier plan, 1 ligne de sensible avec 4 lignes de résistant) à la maladie dans les parcelles en sensible pure (à l'arrière-plan)

Figure 3 : Gestion de la diversité variétale du riz pluvial pour contrôler la pyriculariose



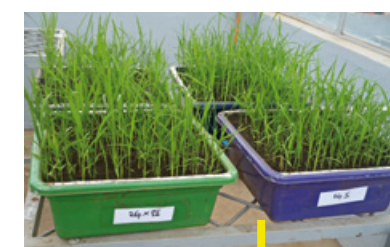
Suivis des épidémies : collectes d'échantillons de feuilles et de panicules malades ; informations sur leur provenance



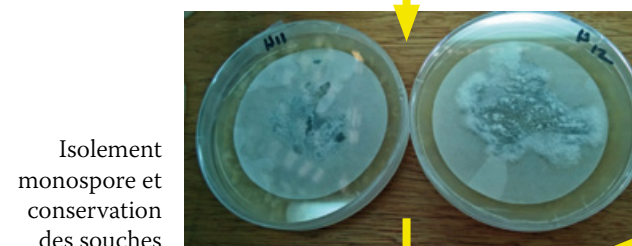
Conservation des échantillons



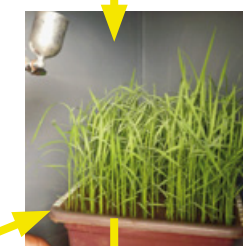
Mise en sporulation des échantillons



Culture des plantes des variétés à tester



Isolement monospore et conservation des souches



Pulvérisation de l'inoculum



Remise en culture des souches et productions d'inoculum



Incubation à l'obscurité et à très forte humidité relative



Lecture des symptômes sur feuilles 7 à 10 jours après inoculation

Figure 4 : Principales étapes de l'inoculation artificielle du riz en laboratoire pour tester la compatibilité entre souche de *M. Oryzae* et variété de riz

© H. Raveloson

Recherche interdisciplinaire pour le développement durable

Application à différentes thématiques de territoire

et la biodiversité des espaces ruraux malgaches

Direction scientifique
Hervé Duchaufour

Editeurs scientifiques
Tantely Razafimbelo-Andriamifidy
Jacqueline Rakotoarisoa
Bruno Ramamonjisoa
Rakotondravao





Recherche interdisciplinaire pour le développement durable

Application à différentes thématiques de territoire

et la biodiversité des espaces ruraux malgaches

Direction scientifique

Hervé Duchaufour

Editeurs scientifiques

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Jacqueline Rakotoarisoa

Bruno Ramamonjisoa

Rakotondravao

Antananarivo 2016



Mise au point des manuscrits et mise aux normes de la collection PARRUR

Hervé DUCHAUFOUR

Graphisme

Arsène Andriantsiferana, GROOVY ARTISTIK

Référence de l'ouvrage pour citation

DUCHAUFOUR H., RAZAFIMBELO T., RAKOTOARISOA J., RAMAMONJISOA B. et RAKOTONDRAVAO (Editeurs Scientifiques) - (2016) : Recherche interdisciplinaire pour le développement durable et la biodiversité des espaces ruraux malgaches. Application à différentes thématiques de territoire. Actes du projet FSP PARRUR « Partenariat et Recherche dans le secteur RURAL ». Antananarivo SCAC/PARRUR, Ed. MYE, 400 pages



Fiarovana amin'ny riaka / La lutte contre l'érosion

© PARRUR, 2016

ISBN : 000-0-0000-0000-0

Préface

Dr Claudine RAMIARISON

Directeur Général de la Recherche Scientifique

Des collectifs de recherche pour pérenniser les agroécosystèmes

La redynamisation de la recherche est au centre des préoccupations à Madagascar depuis ces dernières années. L'adaptation et le renouvellement de ses outils et méthodes face au contexte dans lequel elle évolue, sont indispensables afin d'améliorer les performances et lui permettre de prendre sa place dans le paysage économique et social du pays. La recherche a été marquée par d'importantes évolutions visant à lui donner plus de lisibilité.

Le présent ouvrage s'inscrit dans cette nouvelle dynamique de la R&D à Madagascar apportée par la stratégie nationale de la Recherche adoptée en 2013, ainsi que par les récents plans directeurs de la recherche, plus particulièrement celui portant sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et nutritionnelle et, celui traitant de l'environnement et du changement climatique. Il porte sur l'analyse des multiples facettes du développement rural et de l'agriculture malgache, domaines de recherche ayant toujours fait partie des priorités à Madagascar.

C'est un recueil de travaux menés tout au long de ces cinq dernières années, avec le soutien du projet Fonds de Solidarité Prioritaire « Partenariat et Recherche dans le secteur RURAL », sur des thématiques très diversifiées du développement rural. Ces recherches répondent aux enjeux qui sont à la fois naturel, environnemental, économique, social et culturel.

Les besoins de la R&D actuels vont, en effet, au-delà des inventaires et de l'amélioration des connaissances, puisque de plus en plus les attentes de la population tendent vers la satisfaction des besoins économiques et vers une dimension de valorisation des ressources naturelles.

Accroissement de la demande agricole, baisse de la productivité, capacités de résilience face au changement climatique, font partie des enjeux pour lesquels des attentes sont fortement exprimées par la population et auxquels cet ouvrage donne des éléments de réponses. Ce qui le rend d'autant plus pertinents pour les prises de décision dans ce secteur de l'économie nationale.

Les thématiques traitées ont fait appel à des chercheurs d'origine diversifiée, nationaux comme internationaux, regroupés au sein de collectifs créés à cet effet. Elles abordent des sujets d'actualité, tels que les normes et la qualité des produits de rente, les enjeux et impacts du changement climatique, à travers les recherches sur le carbone du sol, les paiements pour les services environnementaux, l'analyse de certaines filières à forte valeur ajoutée ou encore, les problèmes de santé animale. En outre, la relance de certaines productions qui ont fait la renommée de Madagascar, les mécanismes de marché, ont fait l'objet d'études présentées dans cet ouvrage.

Les approches dans la réalisation de ces travaux ont voulu innover, démontrant que les filières agricoles révèlent de multiples facettes et ne sont pas uniquement l'apanage d'une discipline unique ou encore d'une institution. Elles concernent aussi d'autres champs relevant des sciences de la nature et de l'environnement, ceux de la société et de la culture qui ont leurs apports dans la recherche sur le développement rural, les résultats obtenus s'en trouvent d'autant plus riches.

Le ton a été donné dès l'ouverture même des appels d'offre lancés requérant l'interdisciplinarité dans la composition des équipes, impliquant des opérateurs et autres utilisateurs des résultats et la collaboration entre institutions nationales et internationales.

L'objectif de cette mutualisation des ressources humaines et matérielles est d'optimiser les échanges de savoir-faire et de méthodes. Ce qui peut donner des résultats inattendus au sein de chaque collectif.

Ces collectifs créés constituent en tant que tel des dispositifs visant à améliorer l'efficacité des politiques de gestion même de la recherche à Madagascar. En tant que méthode, ils font partie de l'apprentissage dans ce contexte de mondialisation.

Les interactions entre formation-recherche-action, l'implication d'étudiants, de jeunes chercheurs, de doctorants aux côtés de chercheurs seniors et des partenaires traduisent une volonté de former à la recherche par la recherche, tel que préconisée dans la stratégie nationale de l'année 2013. Cette démarche répond aux besoins de former une relève permettant de pallier au vieillissement progressif du personnel chercheur et enseignant.

La pérennisation de ces approches de mutualisation par l'intermédiaire de ces pôles de compétence ou collectifs promus par la Stratégie Nationale de la Recherche de 2013, est destinée à faire avancer les réflexions scientifiques et, dans le cas présent, pour le bénéfice du développement rural à Madagascar. Elle devient un impératif pour améliorer les performances. Elles commencent à être visibles, plus particulièrement avec la collaboration progressive entre les écoles doctorales et les centres nationaux de recherche, dans le développement de projets communs, visant à rationaliser les activités et les fonctions.

Certes, il existe des contraintes liées à des cloisonnements disciplinaires que les chercheurs doivent surmonter. Mais les travaux menés dans le cadre du FSP PARRUR qui sont présentés dans le présent ouvrage, ont valeur d'expériences pour la conduite de recherche mutualisée dans le domaine du développement rural.

La pertinence des approches peut être appréciée à travers les résultats des travaux menés ; de même, les échanges au sein des équipes pluridisciplinaires permettent de mieux faire face aux enjeux et défis nouveaux.



« Les connaissances sont de plus en plus segmentées et les problèmes à résoudre de plus en plus complexes et globaux »
Edgar Morin, article du journal Le Monde du 27/02/1998

Présentation

Hervé DUCHAUFOUR

Chef de projet PARRUR
Coopération franco-malgache en appui à
l'Enseignement Supérieur et à la Recherche Scientifique

Un pays riche, des territoires variés mais une ruralité stagnante et pauvre !

L'étendue des territoires de Madagascar lui permet de disposer d'un potentiel agricole considérable à l'image de la diversité de ses produits agricoles, de sa richesse de cultures d'exportations (cacao, vanille, litchi, épices...) et de ses ressources naturelles dont la plupart sont autant emblématiques qu'endémiques.

Bien que le secteur agricole emploie 86 % de la population nationale dont 60 % de jeunes, il ne contribue qu'à 26 % du PIB du pays (Note d'Orientation Politique du PSAEP-CAADP, 2014). Le développement de son agriculture, insuffisamment utilisée et dominée par la riziculture et l'élevage bovin, se heurte à de nombreux problèmes auxquels s'ajoute une faiblesse de la gouvernance des sous-secteurs AEP¹. Les petits producteurs agricoles souffrent de l'accès insuffisant aux marchés et aux financements destinés à l'achat d'intrants, aux investissements nécessaires pour améliorer les performances de leur agriculture familiale et de la faiblesse de la couverture sanitaire et de la santé publique. Nombreux sont les pauvres des régions reculées les moins favorisées qui ne peuvent profiter des technologies mises au point par la Recherche-Développement en particulier dans les territoires où les politiques publiques ne sont pas porteuses.

Néanmoins, grâce à leur savoir-faire et leurs modes d'organisation autochtones, les populations rurales luttent contre la crise alimentaire et font face au changement climatique en recherchant et adaptant par eux-mêmes des modes de production et d'organisation informels. Les solutions créatives de ces petits exploitants peuvent être une source d'amélioration et d'intensification de la productivité agricole dans les régions aux conditions climatiques les plus favorables et riches en ressources mais leurs actions informelles ne sont pas forcément durables.

Le rôle de la recherche pour le développement durable et la sécurité alimentaire à Madagascar

Le développement de la recherche et de l'innovation dans le secteur rural formel s'est accéléré ces trente dernières années grâce à la création des Centres Nationaux de Recherche (CNR) qui ont appliqué des méthodes scientifiques dans les économies des zones rurales malagasy. Depuis les années 90, les priorités

¹ AEP : Agriculture-Elevage-Pêche.

de la Recherche-Développement dans les sous-secteurs AEP ont été définies par les pouvoirs publics avec l'aide des institutions de recherche internationales et des Partenaires Techniques Financiers (PTF), en proposant comme nouvelle orientation, l'intensification et le développement durables contre la réduction de la pauvreté et l'insécurité alimentaire, tout en conciliant une croissance économique rapide (PSAEP-COMPACT, 2015).

La Recherche-Développement s'est adossée aux politiques publiques opérées à travers les nombreux programmes et projets portés par les documents de références qui se sont échelonnés au fil des années (DSRP, LPDR, PNDR, MAP, SNRD, PNIAEP, PSAEP-COMPACT). Devant l'étendue des contraintes et des problèmes du paysannat rural, son rôle et son importance pour le développement à Madagascar sont indéniables : sa vocation est de répondre aux enjeux cruciaux en matière de sécurité alimentaire, de nutrition, d'augmentation des revenus et de conditions de vie des petits producteurs ruraux, tout en limitant les impacts négatifs sur l'environnement.

Répondre à de nouveaux défis

Au-delà des questions d'augmentation de la production et d'intensification agricole, la recherche dans le secteur rural malgache doit tenir compte des nouveaux défis liés à la mondialisation et au changement climatique. Le chercheur est désormais contraint à sortir de sa tour d'ivoire en ciblant ses objectifs de recherche en fonction des conditions locales, en se souciant d'associer les ruraux les plus défavorisés en tant qu'acteurs et en les aidant à se libérer de leur pauvreté par différents moyens :

- Amélioration de la nutrition (*productivité et qualité d'un produit*) ;
- Augmentation de la résilience (*durabilité et viabilité d'un espace/milieu/espèce*) ;
- Adaptation au changement climatique (*agriculture intelligente face au changement du climat*) ;
- Accès équitable aux ressources naturelles productives en améliorant leur utilisation post-récolte et accès à la technologie génétique (*partage juste et équitable des avantages liés aux ressources*) ;
- Accès à l'information des prix aux marchés (*traçabilité des prix agricoles pour tous*) ;
- ... Mais aussi par la préservation de la biodiversité qui constitue, avec la terre et l'eau, leur première richesse patrimoniale.

Etablir de nouvelles relations entre la recherche et les populations rurales

Lorsque l'on parle de développement rural, le terme dépasse la simple notion de développement agricole. Il englobe l'espace rural où les « agricultures » sont au centre du système socio-économique mais au sein duquel il existe des fonctionnalités multiples et des activités diversifiées pour lesquelles le chercheur, en lien avec le développeur, les intégrera sur le terrain dans un objectif de développement cohérent.

Ainsi, pour mieux servir l'économie, l'environnement et la société des territoires ruraux, les chercheurs ont rénové leurs méthodes de recherche avec des approches plus intégratives et participatives mettant l'agriculteur au premier plan, ceci à chaque étape du processus d'innovation. L'interdisciplinarité, l'approche systémique et la démarche itérative sont devenues leur « *modus operandi* » et s'inscrivent dans cette optique de développement durable et solidaire donnant aujourd'hui plus de crédibilité aux collectifs de recherche qui désormais mettent en place la participation effective des bénéficiaires à la définition et à la mise en œuvre des priorités de la recherche.

Création d'un fonds compétitif

Le Document Cadre de Partenariat (DCP) Madagascar/France (2006-2010) a retenu le secteur du développement rural comme un axe prioritaire de la coopération franco-malgache et la protection de la biodiversité ainsi que le renforcement des capacités par l'enseignement supérieur et la recherche comme des domaines transversaux de partenariat à privilégier. C'est ainsi que le Projet PARRUR (« Partenariat et Recherche dans le secteur RURal »), financé sur le Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) de la coopération française, a été conçu en 2009 pour favoriser le décloisonnement de la recherche malgache dans le secteur du développement rural² par la promotion de dispositifs en partenariat, en lien avec les communautés scientifiques régionale et internationale.

Le FSP PARRUR a été appelé à financer des projets de Recherche-Développement pour promouvoir le secteur rural, construits sur la base de trois critères distinctifs : « Partenariat, interdisciplinarité et mutualisation des compétences » et répondant à trois objectifs spécifiques :

- Recherche sur des systèmes innovants (production et filière) ;
- Renforcement des capacités des producteurs et développement d'innovations technologiques à fort impact ;
- Valorisation des résultats de la recherche auprès des bénéficiaires.

Trois appels à propositions ont été lancés entre 2010 et 2013, chacun ciblant des thématiques spécifiques au développement des espaces ruraux et pour lesquelles se sont constitués des collectifs de recherche pluridisciplinaires regroupant des acteurs de la Recherche-Développement franco-malgache : i) en premier lieu des équipes de la recherche publique issues des CNR et du réseau universitaire malgaches (étudiants de master et des écoles doctorales) ; ii) des chercheurs d'institutions de recherche françaises (IRD, CIRAD, IP, INRA, IFREMER et CNRS) ; iii) des acteurs de terrain représentés le plus souvent par des associations paysannes et des ONG des secteurs environnemental, agricole, agroalimentaire et halieutique ; enfin, iv) des opérateurs du développement à l'exemple des services déconcentrés de l'Etat, des organisations professionnelles ou des entreprises à vocation commerciale.

Les projets ont été sélectionnés par un comité scientifique (indépendant du comité de pilotage) comprenant des scientifiques issus des milieux de la recherche franco-malgache. Ce comité était co-présidé par le chef de projet et une personnalité scientifique indépendante.

Au total, quatorze collectifs ont reçu une subvention allant de 32 à 75 K€ par projet. Chacune des équipes constituées a réuni entre 10 et 20 chercheurs de disciplines différentes. Cet ouvrage présente le résultat scientifique de onze d'entre eux et vient compléter la liste des ouvrages déjà parus dans la collection des éditions PARRUR³.

² Secteur qui fait référence aux domaines de l'agronomie, foresterie, l'environnement, les sciences économiques et sociales.

³ Collectif SYLVA TERRA (2014) : La terre : A qui, pour qui, pourquoi ? (CITE-PARRUR, 196 pages) ; Collectif FPPSM (2015) : Transitions agraires au Sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation (IRD- PARRUR, 366 pages).

Les collectifs de recherche « PARRUR » : Un exemple de recherche thématique pluridisciplinaire pour un modèle de développement rural

Parmi les onze projets, plusieurs font état de « recherches-filières » importantes pour l'alimentation humaine ou pour des opportunités de revenus pour les populations rurales. Le développement d'itinéraires techniques, la mise au point de méthodes de lutte et de leur diffusion auprès des producteurs et l'adoption de technologie de transformation constituent l'axe prioritaire de leurs travaux de recherche. Selon les sujets traités, les collectifs ont répondu aux différents défis exposés en fonction des modèles et des techniques dont les groupes cibles ont besoin :

- **« Réveiller un trésor en sommeil », tel est le slogan porté par les PTF pour relancer la cacaoculture du Sambirano. La recherche y participe ! :**

Grâce à la combinaison d'un climat chaud et humide et de la fertilité du sol, la vallée du Sambirano peut produire les 3 principales variétés de cacao les plus demandées dans le monde. Entre les années 1960 et 1972, l'Institut Français du Café et du Cacao (IFCC) a effectué des recherches sur la sélection de variétés de plants de cacao (Criollo pure - Trinitario hybride), recherches qui ont ensuite été abandonnées durant plus de quarante années. Ces anciennes recherches sur les variétés et les introductions de plants dans les vergers font que le cacao malgache est considéré aujourd'hui comme l'un des meilleurs du monde en obtenant en 2015 le label Cacao Fine de l'Organisation Internationale du Cacao (ICCO-Londres). Les travaux du collectif ont consisté à relancer de toute urgence la recherche sur la **sélection variétale de plants de cacao (chapitre 1)** à partir des 22 clones rescapés des anciennes collections de l'IFCC. Deux procédés ont visé à rehausser la qualité organoleptique des fèves, l'un consistant à la création de champs semenciers biclonaux à partir de la multiplication végétative de plants, le second par la multiplication par embryogénèse somatique des clones sélectionnés. Durant les cinq prochaines années, la recherche s'est engagée à produire plus de 3 millions de plants Criollo/Trinitario pour le compte du projet « Pôles Intégrés de Croissance et Corridors » (PIC2)⁴. En même temps, un important volet de sensibilisation et d'accompagnement à la rénovation des vergers paysans est programmé pour les prochaines années ;

- **Valoriser des espèces à fort potentiel de rente, destinées à l'exportation :**

L'une d'entre elles, peu connue, **le tsiperifery (chapitre 3)**, fait partie des épices rares, recherchées et appréciées des pays consommateurs sous le nom générique de « poivre sauvage à queue ». Cette espèce endémique à Madagascar offre des opportunités de diversification d'activités et de revenus pour les populations rurales mais la désorganisation de la filière et les pratiques de récolte destructives et incontrôlées nécessitent de mettre en place rapidement des techniques de récolte et post-récolte plus durables et de domestiquer le poivrier en le sélectionnant en fonction de la qualité des morphotypes identifiés. D'autres, comme le **girofle (chapitre 2)**, font la renommée de Madagascar à l'exportation. Toutes les parties du giroflier - feuilles, fleurs et fruits - ont des propriétés aromatiques mais leurs caractères parfumés varient selon les stades phénologiques de la plante et les techniques post-récoltes pratiquées. Les recherches ont non seulement permis d'identifier les optimums de qualité et de rendement des huiles essentielles extraites de ces différents matériels végétaux (feuilles et clous) mais aussi contribuent à réduire significativement la consommation en bois-énergie nécessaire à leur extraction ;

- **Assurer aux agriculteurs des Hauts Plateaux un accès à des semences et plants de bonne qualité adaptés localement** afin de lutter contre les maladies et ravageurs de grandes cultures (riz pluvial et pomme de terre) :

La **pyriculariose du riz pluvial (chapitre 4)**, maladie provoquée par un champignon, largement répandue dans les bassins de production malgaches, peut provoquer des ravages lorsque les conditions sont favorables atteignant parfois des pertes jusqu'à 100 % de la récolte. De même, le **flétrissement bactérien de la pomme de terre (chapitre 5)** causé par un pathogène bactérien provoque de graves pertes dans les zones de production d'altitude du Vakinankaratra. Le succès des moyens de lutte contre ces maladies s'est développé grâce à la disponibilité et la diffusion de technologies avancées par la Recherche-Développement lesquels contribuent significativement à la sécurité alimentaire de ces régions d'altitude. L'objectif consiste à accroître la production du riz pluvial et de pommes de terre tout en protégeant les producteurs et l'environnement grâce à l'adoption d'une approche holistique intégrée de protection des cultures : sélection de variétés résistantes (plants et semences sains) qui réduisent le développement de la maladie et des parasites courants et adoption de pratiques culturales améliorées (rotation des cultures, compostage, plantes de couvertures) qui améliorent la qualité des sols ;

L'instabilité et l'envolée des prix agricoles sont néfastes autant pour les producteurs que les consommateurs les plus pauvres. Ce thème est au cœur des débats politiques lorsqu'il est suivi de crises alimentaires dans les pays les plus vulnérables et les plus sensibles aux aléas climatiques (cyclones, sécheresse) et attaques de criquets. La question de la gestion de l'instabilité des prix et de leurs instruments devient un sujet d'actualité qui préoccupe et mobilise de plus en plus les chercheurs et leurs partenaires. Leur objectif est de mettre en place des systèmes d'information efficaces et bon marché dont l'effet permettrait de limiter les obstacles à l'accès aux marchés et à la détérioration des termes de l'échange entre les zones rurales pauvres et les principaux marchés. Cependant, si la mondialisation et le progrès technique sont en effet associés à toute une série d'évolutions technologiques touchant les systèmes d'information, la production, les biens et les services, une des questions que le chercheur se pose est de savoir si ces avantages sont pour autant généralisables et uniformes et donc profitables pour tous.

- **Comment faire accéder et profiter aux ruraux les plus pauvres des technologies de l'information et de la communication pour faire face à la libre concurrence et à la « défaillance » des prix des marchés ? :**

Un collectif et ses partenaires, un opérateur privé et des ONG, se sont interrogés sur l'opérationnalisation et le bienfondé des **Systèmes d'Information des Marchés (SIM) au niveau de la filière riz (chapitre 6)**. Leurs études ont comparé deux bassins de productions à Madagascar, l'un bien desservi et proche de la capitale, le second enclavé avec des services d'infrastructures et de réseau routier défaillants. Les travaux ont porté sur deux aspects : i) analyse de l'impact des améliorations de communication dont l'effet attendu est d'homogénéiser la demande, et ii) le suivi des niveaux de concurrence sur les marchés. Différentes catégories d'acteurs intervenant dans la chaîne de commercialisation et distribution du riz ont été enquêtées, des petits producteurs les plus pauvres et les plus reculés qui bénéficient le moins de ces services jusqu'aux plus gros collecteurs et revendeurs dont les stratégies de commercialisation intensifient la concurrence des prix des principaux marchés. Les résultats de leur expertise scientifique mettent clairement en évidence la nécessité d'anticiper les besoins et la définition d'une politique de stabilisation des prix ainsi que l'émergence d'une forme de gouvernance au niveau des marchés impliquant de fait, une certaine coordination entre l'Etat et les acteurs privés les plus influents de la filière. Au niveau des territoires de production, les programmes d'appui à la filière ont le devoir de mettre en avant des stratégies d'action qui permettraient d'élargir le marché ; celles-ci passeraient d'une part par le développement de l'esprit d'entreprise et de la gestion communautaire des stocks des populations pauvres, et d'autre part par des échanges équitables et formels entre grands et petits producteurs.

⁴ Contrat entre la station de recherche du FOFIFA à Ambanja et le projet PIC2.

L'élevage est un enjeu majeur à Madagascar puisque l'animal constitue une source d'alimentation pour la famille et une source de revenus et d'épargne pour les exploitants. Dans le domaine de la santé animale, la situation de Madagascar fait face à des maladies responsables d'épizooties meurtrières ainsi que de zoonoses majeures qui sont loin d'être globalement maîtrisées faute de campagnes de sensibilisation et de vaccination adaptées à l'échelle du pays. Les recherches effectuées par deux collectifs ont d'abord une vocation sanitaire afin de réorienter les actions vis à vis de certaines de ces maladies qui ont essentiellement un impact économique. Elles contribuent également à faire face aux crises sanitaires qui peuvent se développer localement et qui souvent, mobilisent des moyens financiers et humains considérables.

- **Mieux connaître la diversité génétique du matériel halieutique pour accroître la performance zootechnique des produits piscicoles :**

Depuis plus d'un demi-siècle à Madagascar, le succès de la *pisciculture familiale et de la rizipisciculture (chapitre 7)* chez les petits producteurs d'alevins (écloserie paysanne) et éleveurs-pisciculteurs (grossissement) est grandissant. Cette augmentation de la production piscicole, notamment du tilapia et de la carpe, réduit significativement l'insécurité alimentaire et la malnutrition des populations rurales. Cependant, cette intensification et accélération piscicole n'ont jamais fait l'objet de recherche intensive et de suivi sur le développement des souches introduites par les centres d'expérimentations de l'époque. Un collectif s'est constitué pour dédier ses recherches à la génétique de la carpe (comparée parallèlement à celle du tilapia) à Madagascar. Une approche globale de la gestion de la variabilité génétique chez les populations de carpe, fondée à la fois sur un examen des pratiques et sur des études génétiques des populations de carpe montre l'adaptation des poissons aux différents milieux, sauvages et d'élevage, et l'existence de trois populations de carpe différentes sur le plan génétique qui seraient la conséquence des différentes introductions successives. Ces résultats apportent de précieuses informations pour l'élaboration des stratégies d'appui à ce secteur.

- **Participer à la mise en place d'une bonne politique de lutte contre la cysticercose et la maladie de Newcastle qui constituent un problème de santé publique important à Madagascar :**

La prévalence active de la *cysticercose (chapitre 9)* y est estimée à 10%. Elle indique une forte endémicité qui place le pays parmi les plus touchés du monde. Elle peut atteindre les sujets de tous les âges et est présente aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural. La maladie de *Newcastle (chapitre 8)* quant à elle, est la première maladie des volailles à Madagascar. Elle est présente dans tout le pays et occasionne une perte économique importante liée à la propagation de ce virus, souvent négligé par les éleveurs de volailles. Ces derniers accordent insuffisamment d'importance aux mortalités répétées au sein de leur cheptel alors que ces deux maladies constituent une grande menace pour la santé animale et celle des consommateurs. A cela s'ajoute le manque de sensibilisation des éleveurs concernant les épidémies qui rend très difficile le suivi et la maîtrise des dispositifs d'épidémiologie-surveillance (FERT-FIFATA, 2012). Deux collectifs ont donc consacré leurs efforts de recherche pour mettre en place des mesures efficaces de *lutte contre ces deux maladies animales*. Leurs objectifs à moyen terme est d'entraîner une chute importante de la prévalence en améliorant les performances productives de ces élevages (porcs et volailles) au niveau de l'exploitation, de maîtriser les épidémies et de protéger les consommateurs.

Il est présent dans les esprits de tous les malgaches, mais aussi celui des touristes vazaha. *Le baobab (chapitre 10)* est un arbre qui détient tous les records, celui de longévité, de tour de circonférence... Appartenant aux espèces succulentes, le parenchyme spongieux de son tronc se gorge d'eau, ce qui lui permet ainsi de résister à de longues sécheresses. Sur les huit espèces dans le monde, six sur les sept présentes à Madagascar sont endémiques et classées sur la liste rouge des espèces en danger d'extinction

par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). Aujourd'hui, les parcs forestiers à forte population de baobabs de l'Ouest de Madagascar se réduisent comme une peau de chagrin et ces géants se retrouvent de plus en plus isolés au milieu d'un espace agricole voué à l'agriculture vivrière sur brûlis (hatsaky). Depuis longtemps, les chercheurs se sont intéressés à ces arbres emblématiques ; un collectif impliquant des spécialistes seniors et de jeunes doctorants, a voué entièrement ses travaux de recherche à la compréhension de la résilience de ces espèces dans le but de préserver leur biodiversité. La biologie des baobabs est particulièrement difficile à étudier : la floraison s'étale sur une courte période et les fleurs, éphémères, éclosent la nuit. En revanche, les fruits (graines des drupes) présentent un épais tégument résistant qui permet à la graine de persister plusieurs mois en attendant les conditions les plus favorables à la germination. De jeunes chercheurs se sont intéressés aux différents modes de reproduction des baobabs de l'Ouest malgache : du parfum émis par les fleurs qui attire les visiteurs-pollinisateurs ; de la levée tégumentaire des graines dans le transit intestinal de grands vertébrés ; de leur dispersion sur de grandes distances par l'eau ; de la prédation des jeunes pousses par les achatines. Le lecteur découvrira toutes ces caractéristiques écosystémiques qui font que cet arbre se régénère tant bien que mal malgré un milieu environnant de plus en plus hostile.

La littérature scientifique regorge d'exemples de modes d'utilisation des sols maximisant l'utilisation de l'énergie lumineuse et de l'eau pour optimiser la production de biomasse, développer les cycles des minéraux et de la matière organique, éviter les pertes en eau, jouer sur les effets allopathiques entre les plantes et les microorganismes et enfin, tirer parti des caractéristiques de diverses espèces cultivées pour minimiser la compétition entre elles et maximiser leurs complémentarités. Ce type de raisonnement écosystémique est l'apanage d'un réseau de recherche très actif à Madagascar qui oriente ses travaux pour mettre en valeur ces processus dans différents milieux agroécologiques et favoriser le développement de systèmes agricoles durables et donc « écologiquement intensifs ».

- **Optimiser les processus agroécologiques en utilisant au mieux les propriétés des agroécosystèmes cultivés pour lutter contre le changement climatique :**

Le collectif s'est basé sur des observations et pratiques des agriculteurs de gestion durable et sur la performance de leurs écosystèmes agroforestiers à base de giroflier développés dans les territoires de l'Est de Madagascar. Les résultats de leurs observations montrent que l'association agriculture - élevage, l'agroforesterie, le développement de cultures associées, les techniques de SCV (« agriculture de conservation ») opérés dans différentes situations de milieu, permettent de restaurer la fertilité des sols et d'améliorer la résilience des systèmes de culture associés au couvert forestier par l'entremise de la *séquestration du CO₂ (chapitre 11)*. Au même titre que les cacaoyères sous couvert du Sambirano, ces recherches opérées dans les systèmes agroforestiers frontaliers aux corridors forestiers, viennent confirmer la nécessité de combiner les connaissances paysannes et celles des chercheurs pour mettre au point des indicateurs du changement. De tels systèmes durables pourront être transposables et adaptés à d'autres conditions socio-économiques et écologiques locales et faire partie des nouvelles stratégies d'adaptation et d'atténuation avec les parties prenantes, les PTF et opérateurs de terrain en priorité. Les ONG peuvent effectivement jouer un rôle important de médiateurs et de partenaires dans l'établissement de ces relations et dans la mise en oeuvre de recherches en partenariat... L'exemple du programme « Mahavotra », opéré par AGRISUD International et Fondation GOODPLANET dans la région Itasy, en est la parfaite démonstration.

Partager la connaissance et former les formateurs pour que les jeunes agriculteurs puissent exploiter une plus large part de la chaîne des valeurs

Il ne peut y avoir de bons conseils prodigués aux agriculteurs sans service de vulgarisation efficaces, efficaces et surtout, sans contenu ! Convaincu que la formation professionnelle agricole constitue l'une des clefs du développement rural, le projet PARRUR s'est fermement engagé à mettre les connaissances issues de sa Recherche-Développement au service de l'action de la politique et de la formation professionnelle agricole.

Aucun des collectifs n'a été négligé même si au départ, la plupart des chercheurs considéraient qu'il s'agissait d'un surplus de travail et d'un nouveau métier (chercheur-vulgarisateur) qui n'entraînait pas directement dans leur champ de compétences ! Une démarche réflexive, suivie d'une mobilisation active, ont ainsi permis de faire une mise au point sur les initiatives et les opportunités prometteuses de leur production scientifique.

Un volet du projet PARRUR, dénommé « Capitalisation-Valorisation-Communication/Diffusion » (CVC/D) des résultats de la recherche, leur a été consacré. Différents modèles et supports de vulgarisation ont été élaborés avec l'appui de la cellule du projet pour une diffusion à grande échelle auprès des populations cibles. Sa vocation est de répondre de manière adaptée et différenciée aux difficultés spécifiques ressenties par les agriculteurs au moyen de messages clés, de conseils et de mesures accessibles.

Son contenu est inséré dans un DVD-ROM. Ce dernier comprend la fourniture de la production scientifique, notamment les articles parus dans des revues spécialisées, mais surtout les outils pédagogiques (*carnet de vulgarisation, posters, affiches, catalogues de variétés, dépliants*) rédigés dans les deux langues pour une diffusion des messages sur le terrain. D'autres supports sont destinés préférentiellement à l'enseignement professionnel et numérique (*films documentaires⁵, podcasts⁶, contenus d'écoles thématiques, modules de formation, etc.*).

Ce volet CVC/D PARRUR favorise la libre circulation de l'information documentaire, scientifique et technique. Il est donc à considérer comme un service à la formation continue et non formelle dont l'utilisation potentielle est destinée aux programmes mis en place dans le cadre de la refonte du système de la formation professionnelle agricole à Madagascar (FORMAPROD, 2014). Quelques uns de ces outils peuvent également être facilement exploités par les instituteurs des écoles rurales.

Ce volet doit aller au-delà de la simple fourniture d'informations techniques aux populations cibles, que ce soit sur le type de variétés de semences à utiliser, la façon de lutter contre les maladies et les ravageurs ou la diffusion de techniques de semis sous couvert végétal performantes...

Une approche pluraliste de son utilisation est aussi à encourager avec l'implication des ONG, notamment pour :

- Impulser des compétences «transversales», non techniques ;
- Générer et promouvoir des innovations auprès des associations paysannes, des petites entreprises de transformation ou de différents groupes et individus opérant tout au long des chaînes de valeur ;
- Autonomiser les agriculteurs en les aidant à développer leurs capacités à tirer parti des opportunités de marché, à s'adapter au changement climatique, à forger de nouveaux partenariats, à apprendre comment utiliser au mieux les technologies de l'information et de la communication.

⁵ Accessibles sur le site You Tube : <https://www.youtube.com/channel/UCpyWyliXyNUosd55Nw3uzNw>

⁶ Mis en ligne sur la plateforme audiovisuelle UNuM.pod : <http://pod.irenala.edu.mg/videos/>

Acronymes et abréviations

ACP	: Analyse en Composantes Principales
ACM	: Agent Communautaire de Santé Animale
ACSA	: Agent Communautaire de Santé Animale
ADAPS	: Association pour le Développement de l'Agriculture et du Paysannat du Sambirano (Ambanja)
AFC	: Analyse Factorielle de Correspondance
Ag	: Antigène
AGRISUD	: Organisation de solidarité internationale française (Bordeaux - France)
AFDI	: Agriculteurs Français et Développement International
APDRA	: Association française pour le développement de la pisciculture paysanne
ARDA	: Association Régionale de Développement Aquacole
AVSF	: Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières
BM	: Banque Mondiale
C	: Carbone
CAH	: Classification Ascendante Hiérarchique
CC	: Changement Climatique
CDC	: Center for Disease Control (CYSTICERCOSE)
CNR	: Centre National de Recherche (Madagascar)
CNRE	: Centre National de Recherches en Environnement (Madagascar)
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique (France)
COI	: Commission de l'Océan Indien
CTHT	: Centre Technique Horticole de Tamatave
CRFPA	: Centre Régional de Formation Professionnelle Agricole
CPG	: Chromatographie en Phase Gazeuse
CVC/D	: Capitalisation-Valorisation-Communication/Diffusion (Projet PARRUR)
DALYs	: Disability Adjusted Life Year (CYSTICERCOSE)
DCP	: Document Cadre de Partenariat (France-Madagascar)
DIREL	: Direction Régionale de l'Elevage (Madagascar)
DRZV	: Département de Recherche Zootechnique et Vétérinaire (FOFIFA - Madagascar)
DSPR	: Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (Madagascar)
DSV	: Direction des Services Vétérinaires (Madagascar)
EITB	: Enzyme-linked ImmunoelctroTransfer Blot (Test Western Blot) (CYSTICERCOSE)
ELISA	: Enzyme Linked ImmunoSorbent Assay (test Immunologique) (RALSTONIA et CYSTICERCOSE)

EP	: Ecloserie Paysanne (MADAPISCI)
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l’Université d’Antananarivo
FERT	: Association française de coopération internationale pour le développement agricole
FOFIFA	: Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural malgache (Madagascar)
FORMAPROD	: Programme de formation professionnelle et d’amélioration de la productivité agricole (FIDA, Madagascar)
FSP	: Fonds de Solidarité Prioritaire (MAEDI - France)
GCV	: Grenier Commun Villageois (INFORIZ)
GES	: Gaz à Effet de Serre (CARBONE)
HE	: Huile Essentielle
IA	: Influenza Aviaire (Newcastle)
IFCC	: Institut Français du Café et du Cacao
IFREMER	: Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer (France)
IHSM	: Institut Halieutique et des Sciences Marines de l’Université de Tuléar
IMRA	: Institut Malgache de Recherches Appliquées
IMVAVET	: Institut Malgache des Vaccins Vétérinaires
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique (France)
INSTAT	: Institut National de la Statistique (Madagascar)
IPM	: Institut Pasteur de Madagascar
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement (France)
IRM	: Imagerie par Résonance Magnétique
IUCN	: Union internationale pour la conservation de la nature
LCR	: Liquide céphalo-rachidien (CYSTICERCOSE)
MAEDI	: Ministère des Affaires Etrangères et du Développement International (France)
MAP	: Plan d’Action pour Madagascar
MBG	: Missouri Botanical Garden (Etats-Unis)
MN	: Maladie de Newcastle
MRD	: Maximum Recovery Diluant (RALSTONIA)
NCC	: Neurocysticercose
NDV	: Newcastle Disease Virus
OdR	: Observatoire du Riz (Madagascar)
OIE	: Organisation Mondiale de la Santé Animale
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
PARRUR	: PARtenariat et Recherche dans le secteur RURal

PASAEP	: Programme Sectoriel Agriculture Elevage et Pêche (Madagascar)
PCR	: Polymerase Chain Reaction (Newcastle et CYSTICERCOSE)
PED	: Pays en développement
PIC 2	: Pôles Intégrés de Croissance et Corridors (BM, Madagascar)
PMG	: Poids de Mille Grains (GIPYRI)
PNIAEP	: Plan National d’Investissement Agriculture, Elevage et Pêche (Madagascar)
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
POCT	: Programme Opérationnel de Coopération Territoriale (FED-FEDER)
PPA	: Producteurs Privés d’Alevins (MADAPISCI)
QUALIREG	: Réseau scientifique et technique des acteurs de l’Agroalimentaire de l’Océan Indien
TEF	: Herbier du FOFIFA
TAN	: Herbier de Tsimbazaza (PBZT)
REDD+	: Réduction des Emissions de gaz à effet de serre issus de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (CARBONE)
RFLP	: Restriction Fragment Length polymorphism (CYSTICERCOSE)
SCAC	: Service de Coopération et d’Action Culturelle (Ambassade de France)
SCRID	: Systèmes de Culture et Rizicultures Durables
SCO	: Stock de Carbone Organique (CARBONE)
SCV	: Semis direct sous Couverture Végétale
SECAMAD	: Société d’Exploitation de Cacao de Madagascar
SIM	: Système d’Information sur le Marché
SNC	: Système Nerveux Central (CYSTICERCOSE)
SM	: Spectrométrie de Masse
SNRD	: Stratégie Nationale de Relance du Développement (Madagascar)
SOMIA	: Société Malgache d’Industrie et d’Agriculture (QUALIKKO)
SPAD	: Systèmes de Productions d’Altitude et Durabilité (FOFIFA, Antsirabe)
SRPRH	: Service Régional de la Pêche et des Ressources Halieutiques
UMR	: Unité Mixte de Recherche
UNICEF	: Fonds des Nations unies pour l’enfance
WASH	: Water Sanitation Hygiene (CYSTICERCOSE)